

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

## **Měření zbytkového pnutí po broušení VBD**

Measurement of Residual Tension after Gringing the Inserts

Autor práce:

Gracián Guskovič

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

OSTRAVA 2013

## Zadání bakalářské práce

Student: **Gracián Guskovič**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Měření zbytkového pnutí po broušení VBD**  
**Measurement of Residual Tension after Gringing the Inserts**

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Zbytkové pnutí a způsoby jeho měření.
3. Návrh metodiky měření pro konkrétní případ.
4. Diskuse experimentálních prací.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] HUMÁR, A.; PÍŠKA, M. *Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály*. MM Průmyslové spektrum, Speciální vydání, 2004, 110 s. ISSN 1212-2572.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

  
Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2013




podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která se oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ..20.5.2013....

  
.....  
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Gracián Guskovič

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Černá cesta 29, Olomouc. 772 00

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

GUSKOVIČ, G. *Měření zbytkového pnutí po broušení VBD: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2013, 62 s. Vedoucí práce: Vrba, V.

Bakalářská práce se zabývá zbytkovým pnutím ve výrobcích ze slinutých karbidů po broušení. Ve firmě Pramet tools s. r. o. problémy s pnutím mohou negativně působit při konečném užití výrobku. Na základě tohoto jevu, se zjišťuje, jakou roli hrají podmínky broušení. Práce obsahuje teoretickou část (slinuté karbidy, technologii broušení, princip Barkhausenova šumu), návrh metodiky měření, jak nebroušeného výrobku, tak i broušeného. Toto pnutí bylo experimentálně změřeno přístrojem, který využívá Barkhausenova šumu, v laboratořích VŠB-TU Ostrava. Výsledky měření jsou shrnuty v grafech, které poukazují na zbytkové pnutí na jednotlivých vzorcích. Výsledky měření budou využity ve firmě Pramet tools s. r. o.

## ANNOTATION OF THESIS

GUSKOVIČ, G. *Measurement of Residual Tension after Gringing the Inserts: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2013, 62 p. Thesis head: Vrba, V.

The bachelor thesis focuses on residual tension in slintered carbides products after grinding. There could be negative tension effects with the product usage in Pramet tools s.r.o. company. The conditions of grinding are about to be found out pursuant to this fact. Thesis consist of theoretical part (slintered carbides, grinding technology, Barkhausen's noise principle), methodical measure draft of an ungrinded as well as grinded product. This tension was experimentally measured by a device using Barkhausen's noise in VŠB-TU Ostrava laboratories. The results of this measurement are summarized in charts showing residual tension in single samples. These results are going to be used in Pramet tools s.r.o. company.

**OBSAH**

OBSAH .....	6
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK .....	7
1. ÚVOD .....	8
2. OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU .....	9
2.1. Historie firmy Pramet tools .....	9
2.2. Slinuté karbidy .....	10
2.2.1. Historický vývoj .....	12
2.2.2. Nepovlakované slinuté karbidy .....	19
2.2.3. Povlakované slinuté karbidy .....	24
2.3. Technologie broušení .....	30
3. ZBYTKOVÉ PNUTÍ A ZPŮSOBY JEHO MĚŘENÍ .....	37
3.1. Barkhausenův šum .....	37
3.1.1. Princip Barkhausenova šumu .....	37
3.1.2. Charakteristika a možnosti zařízení .....	38
3.1.3. Vznik spálenin po broušení .....	38
3.1.4. Zhodnocení Barkhausenova šumu .....	40
3.2. Jiné metody měření pnutí .....	41
3.2.1. Rentgenografická metoda .....	41
3.2.2. Magnetická metoda .....	41
3.2.3. Mechanická metoda .....	42
4. NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ PRO KONKRÉTNÍ PŘÍPAD .....	43
4.1. Bruska WBM 221 od firmy .....	45
4.2. Měření konkrétního případu .....	46
5. DISKUZE EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ .....	48
6. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	54
7. ZÁVĚR .....	55
PODĚKOVÁNÍ .....	56
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	57
SEZNAM TABULEK .....	59
SEZNAM GRAFŮ .....	60

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK**

Značka	Název	Jednotka
CAD	počítačem podporovaný návrh	[-]
CAM	počítačem podporovaná výroba	[-]
VBD	vyměnitelné břitové destičky	[-]
WC	karbid wolframu	[-]
°C	stupně celsia	[°]
Co	kobalt	[%]
VC	karbid vanadu	[%]
Ni	nikl	[%]
Cr	chróm	[%]
Nb	niob	[%]
Ta	tantal	[%]
Ti	titan	[%]
TiC	karbid titanu	[%]
TiN	nitrid titanu	[%]
Al	hliník	[%]
Mn	mangan	[%]
Mo	molybden	[%]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý	[%]
SK	slinuté karbidy	[-]
HIP	vysokoteplotní izostatické lisování	[-]
CVD	chemické povlakování	[-]
PVD	chemické povlakování	[-]
$v_k$	rychlost prusného kotouče	[m/s]
$v_o$	rychlost součástky	[m/s]
$v_c$	rychlost broušení	[m/s]
$f$	posuv	[mm/min]
V0	vzorek 0	[ks]
V1	vzorek 1	[ks]
V2	vzorek 2	[ks]
CBN	automatická zpráva	[-]
MBN	milivolty	

## ÚVOD

Strojírenství je obor založen na základech fyziky a nauky o materiálu. Zabývá se návrhem, výrobou, údržbou strojů a nejrůznějších zařízení. Je to jedna z nejrozšířenějších a nejstarších technických disciplín. Strojírenství zahrnuje obory jako například mechaniku, kinematiku, dynamiku, hydromechaniku, termomechaniku a nauku o materiálu. V oboru se používají nástroje, jakými jsou např.: CAD, CAM nebo Creo atd. Největší rozvoj zaznamenalo strojírenství v období tzv. „průmyslové revoluce“. Avšak v tomto oboru dochází stále k vývoji.



## 2. OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU

Firma Pramet Tools s. r. o. se na mne obrátila s problémem zbytkového pnutí po broušení VBD ve slinutých karbidech. Toto pnutí může negativně ovlivnit vlastnosti výrobku. Úkolem bylo zjistit metodiku měření zbytkového pnutí a prokázat pnutí po broušení VBD.

### 2.1. Historie firmy Pramet tools

Ve společnosti Pramet Tools s. r. o. vychází výroba slinutých karbidů z tradice slinutého karbidu v Československu od třicátých let dvacátého století. V Šumperku v roce 1951 začala výroba součástí ze slinutého karbidu a výroba řezných nástrojů se slinutým karbidem. [7]

K zásadní změně prostředí došlo v devadesátých letech minulého století. Tehdejší podniky donutila tato situace k zásadní restrukturalizaci. Ty podniky, které touto restrukturalizací neprošly nebo se pokoušely neúspěšně projít, avšak neúspěšně, tak zanikly. Společnost Pramet Tools s. r. o. však tuto restrukturalizaci úspěšně zvládla a dnes staví na svých znalostech, zkušenostech, tradicích, prestiži a zkušenostech svých zaměstnanců. Více jak šedesátiletá tradice a zkušenosti s výrobou slinutých karbidů, reprodukovatelná kvalita materiálů a výzkum i vývoj firmě Pramet Tools s. r. o. umožnily získat jednu z vedoucích pozic na tuzemském trhu a také neustále rostoucí uplatnění na velmi náročných světových trzích. [7]

Roku 1999 došlo k propojení s finančně silným partnerem a započala tak nová etapa společnosti Pramet Tools. Propojení proběhlo se Švédskou skupinou Seco, která zaujímá jednu z nejlepších světových pozic mezi výrobcí obráběcích nástrojů ze slinutého karbidu. Společnost navýšila své základní jmění a tyto získané prostředky použila na nákup aktiv. Společnost Pramet Tools od roku 2000 díky vývoji a výzkumu ve vlastní firmě prakticky kompletně inovovala výrobní sortiment nástrojů pro třískové obrábění, a to jak po stránce nových tvarů a geometrií nástrojů pro třískové obrábění nástrojů, tak po stránce materiálové, materiály pro tvářecí a lisovací nářadí ze slinutých karbidů prošly stejnou

inovací. Tento nový sortiment tak dnes plně odpovídá požadavkům moderních technologických postupů obrábění a ve srovnání s původním sortimentem narůstá výkonnost o desítky procent. [7]

Pramet Tools dodává své kvalitní výrobky do mnoha evropských zemí, ale stále vyšší část prodeje směřuje do zemí Jižní Ameriky a jihovýchodní Asie, především do Indie a Číny. V současnosti se společnost soustředí na aktivity nejen na maximální možné zkvalitňování nabídky a servisu pro stávající i nové zákazníky. Pramet Tools prodává své výrobky i s technickým poradenstvím a velkou sítí servisu pro maximální spokojenost zákazníků. [7]



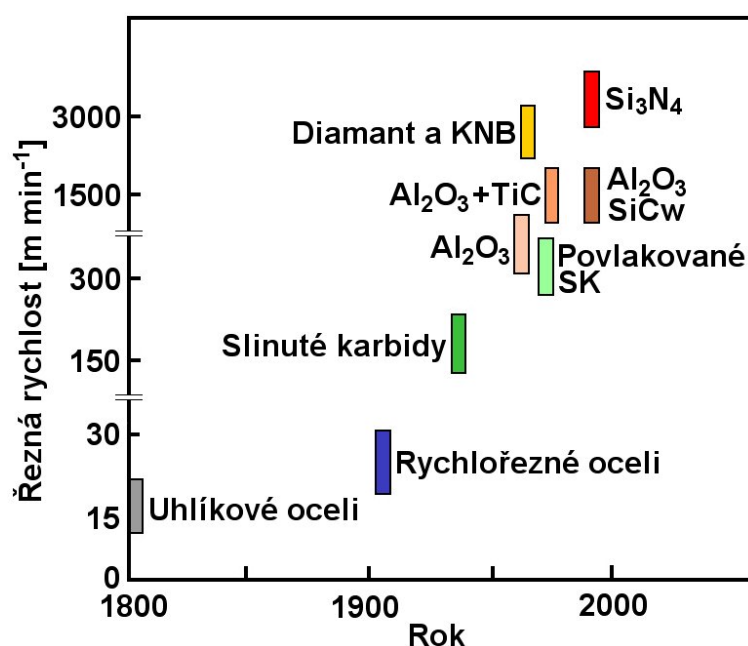
Obr. 1 - Firma Pramet Tools v Šumperku

## 2.2. Slinuté karbidy

Průmyslové podniky po celém světě používají k výrobě strojních součástí různé materiály (kovové- oceli, litiny a slitiny; nekovové- keramika, vláknově vyztužené kompozity atd.), zpracované různými metodami obrábění. Největší zastoupení tvoří soustružení, frézování a vrtání. K odebrání třísky a vytvoření nových povrchů

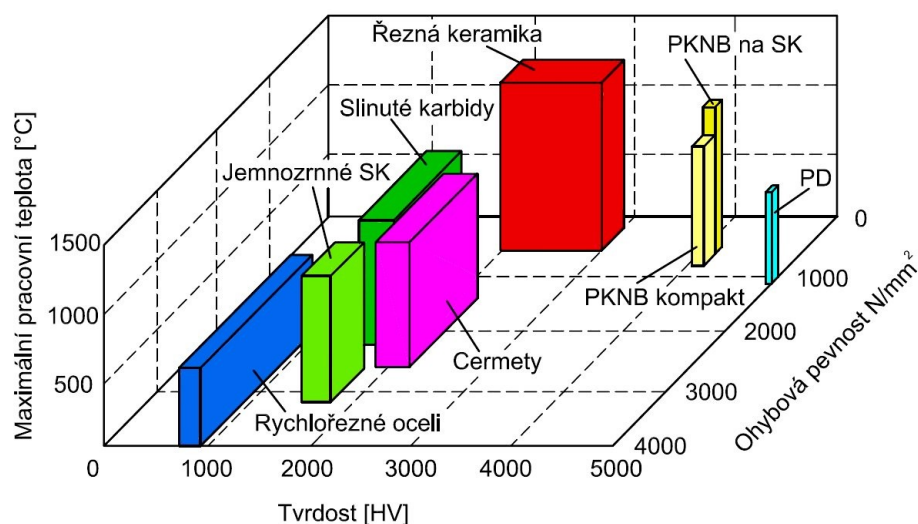
požadovaného tvaru, rozměrů a jakosti musí mít břit řezného nástroje odpovídající tvrdost, houževnatost. Tyto hodnoty by neměly poklesnout ani při vysokých pracovních teplotách. [2]

Řezné nástroje jsou vyráběny z rozmanitých materiálů např. nástrojové oceli (zejména rychlořezné oceli), slinuté karbidy (bez povlaků i s tvrdými, otěruvzdornými povlaky), cermety (včetně povlakovaných), řeznou keramiku (včetně povlakované) a supertvrdé materiály (syntetický diamant a kubický nitrid boru). Tento široký sortiment je dán dlouhodobým výzkumem, který prakticky každým novým druhem posunul použití vyšších řezných rychlostí při obrábění. (obr. 2.) [2]



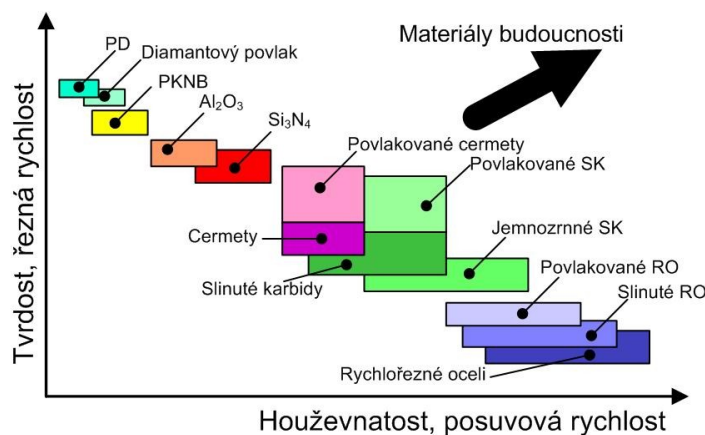
Obr. 2 - Historický vývoj řezných rychlostí [2]

V současné době se výrobci snaží zdokonalovat technologii výroby a specifikaci optimálního využití již známých materiálů, s velmi přesným vymezením aplikační oblasti. Aplikační oblasti jsou vymezeny fyzikálními (měrná hmotnost, součinitel tření, velikost zrna), chemickými (stálost, inertnost), tepelnými (pracovní teplota, teplota tání, tepelná vodivost a délková roztažnost) a mechanickými vlastnostmi (tvrdost, pevnost v ohybu a tlaku, modul pružnosti, lomová houževnatost). (obr. 3.)



Obr. 3 - Vlastnosti nástrojových materiálů [2]

Nástrojové materiály s vysokou tvrdostí se použijí při vyšších řezných rychlostech a menších průřezech třísky, kde převládá spíše tepelné zatížení, tak se použijí materiály s vysokou houževnatostí. V tomto případě lze použít i vyšší posuvové rychlosti (hrubovací obrábění), kde v důsledku většího průřezu třísky převládá mechanické zatížení nad tepelným. (obr. 4.)



Obr. 4 - Vliv mechanických vlastností nástrojového materiálu na pracovní podmínky [2]

### 2.2.1. Historický vývoj

Z dřívějších dob byly známy látky, které mají vyšší tvrdost než kalené nástrojové oceli např. diamant a korund. Tyto přírodní materiály mohly být ve formě volného abraziva

(případně jako brousící kotouče), který se využíval pro broušení kovů na přelomu 19. a 20. století a z důvodů nízké houževnatosti se nemohly využít pro výrobu klasického řezného nástroje s definovatelnou geometrií. Velký krok ve vývoji tvrdých materiálů byl zaznamenán až po užití elektrické pece zkonstruované Moissonem (Paříž, 1897), která zvýšila pracovní teploty výrobního procesu. V jeho laboratoři ve Farmaceutické škole Pařížské univerzity byly poprvé objeveny dva karbidy wolframu –  $W_2C$  (1896, H. Moissen) a  $WC$  (1898, P. Williams). Teplota tání těchto karbidů je  $2\,750\,^{\circ}C$  a  $2\,800\,^{\circ}C$ . Oba karbidy mají vysokou tvrdost a mohou spolu vytvořit eutektickou slitinu s teplotou tavení  $2\,525\,^{\circ}C$ . Mnoho dalších vynálezců a vědců se pomocí elektrické pece snažilo vyrobit umělý diamant. Vzhledem k úrovni znalostí se tento objev nepovedl, avšak získaly přitom nové karbidy, boridy a silicidy, látky s vysokými teplotami tavení. [2]

Poprvé byl karbid wolframu komerčně využit pro drátové průvlaky vyrobené odléváním, ale toto odlévání čistého  $WC$  je velmi neúčelné. Stechiometrická sloučenina při obsahu 6,13% uhlíku se netaví rovnoměrně a při ochlazení je z ní křehká směs  $WC$  a grafitu. Průvlaky se vyrobily v roce 1914 z práškového karbidu wolframu, karbidu molybdenu nebo kombinací těchto karbidů. Karbidy byly lisovány a poté slinovány při nižší teplotě, než je teplota tavení čistého  $WC$ . Výrobky neměli úspěšné užití v průmyslu. [2]

K počátku 20. století se zjistilo, že vlastnosti rychlořezných ocelí jsou dány přítomností velmi tvrdých karbidických částic v kovové matici. Z tohoto důvodu se zkusil vyrobit řezný nástroj z čistého karbidu wolframu. S potížemi za teplot přesahujících  $2\,000\,^{\circ}C$  byl materiál připraven, ale pro užití v praxi se ukázal jako příliš křehký. Poté se na počátku 20. století vyrobilo žhavicí vlákno z wolframového prášku s velikostí zrn o velikosti několik  $\mu m$ . Tento objev nastartoval rozvoj práškové metalurgie, který vyřešil problém výroby nových řezných materiálů na bázi  $WC$ , jež se vyznačovaly do té doby vynikající tvrdostí a odolností proti opotřebení. První výzkumné práce na výrobě wolframového vlákna provedl D. Coolidge v roce 1910 ve Spojených státech amerických. V první řadě se musel vyrobit kovový práškový wolfram redukcí kyseliny wolframové ( $H_2WO_4$ ) pomocí vodíku za teplot  $800\div 950\,^{\circ}C$ . Zrnitost prášku se pohybovala v rozsahu  $1\div 2\,\mu m$  (prášek byl lisován bez mazacích a lisovacích přísad, proto nesměl mít hrubé zrno). Takto získaný prášek lze nauhličit uhlíkem za pomoci britského patentu. Uhlík se získá pro syntézu z uhelného plynu, který proudí v peci. Tento proces, při kterém

absorbuje wolframový prášek, trvá přibližně sedm hodin. Při tomto procesu je velmi pravděpodobné, že dojde k minimálnímu zhrubnutí zrn karbidu wolframu. Na konec se slinuje při teplotách 1 350÷1650 °C, tyto karbidy měli zrna velikost 2÷4 μm. [2]

Velký průkopník v práškové metalurgii Karl Schöter na počátku dvacátých let (1923) ohřál práškový wolfram společně s uhlíkem, tímto způsobem získal práškový karbid wolframu mikrometrické zrnitosti. Dále zjistil, že pokud se karbid wolframu důkladně smíchá s menším množstvím kovu z podskupiny železo – kobalt – nikl (obsahem do 10%) a tento vyliovaný celek je ohříván na teplotu nad 1 300 °C ve vodíkové atmosféře, získá se výrobek s nízkou pórovitostí, značnou pevností a velmi vysokou tvrdostí. Materiál ve výsledku je dokonale vytvrzen a skládá se z velmi rovnoměrně rozptýlených tvrdých zrn karbidu wolframu, který je spojen v jeden celek s houževnatým kovem. Později se zjistilo, že nejvhodnějším kovem je kobalt. I když první zkoumání v oblasti vývoje a výroby slinutého karbidu WC-Co ve firmě Osram byly zaměřeny zejména na drátové průvlaky, ale unikátní vlastnosti předurčili tento nový materiál zejména pro aplikaci řezných nástrojů. Tento materiál umožnil řádově větší obráběcí rychlosti a brzy se stal základem důležité skupiny slinutých karbidů. Výjimečně se pro slinuté karbidy užívá nesprávný technický název „tvrdokovy“, který vznikl z překladu německého výrazu hartmetalles a má vyjadřovat skutečnost, že se jedná o materiály s výjimečnou tvrdostí. [2]

Výrobu slinutého karbidu typu WC-Co pod názvem WIDIA je složeno z německých slov Wie Diamant. Název vyjadřoval nadšení z objevu z řezného materiálu tvrdého jako „diamant“, který se v této formě zachoval až do dnešní doby. Roku 1926 ho rozvinula firma Krupp z Německa. V roce 1927 byl představen na lipském veletrhu pod názvem WIDIA N (obsahoval 94% WC + 6% Co. V ukázkách obrábění oceli (12% Mn) a šedé litiny pracoval slinutý karbid s 2÷3krát vyššími řeznými rychlostmi, které byly užívány v dané době. Roku 1942 vyšel snímek struktury materiálu Widia (zvětšený 1000x) a ukazoval hrubozrnný slinutý karbid s velikostí zrn 2÷6 μm. Dále byl vyvinut v roce 1927 nový druh slinutého karbidu označený písmenem H, obsahoval méně kobaltu (5,15%) než druh N, ale měl jemnější zrna. Výzkumníci, firmy Krupp také zjistily v roce 1929, že velikost zrna wolframu karbidu ovlivňuje vlastnosti výsledného materiálu. V letech 1930-1932 byl vyrobeny slinuté karbidy Widia s obsahem 11% Co (G2) a 15% (G3). S menším časovým odstupem následoval speciální materiál H1 s „nejmenší“ zrnitostí karbidické fáze WC a roku 1939 byl vyroben materiál H167 později označován H2.

U tohoto karbidu byly nově použity přísady menšího množství druhého a třetího karbidu (přičemž byl zvýšen objem Co). Účelem přidání bylo zabránit růstu zrna při slinování. [2]

Jednoduché zkoušky řezivosti při soustružení šedé litiny o tvrdosti 440 HB prokázaly velké rozdíly v trvanlivosti materiálu nástroje před typickým opotřebením. Trvanlivost materiálů – N: 300 s, H1: 1 800s, H2 (H167): 3 600s. Výsledky nám zjevně ukazují, že snižováním zrnitosti slinutého karbidu narůstá trvanlivost nástroje.

K výrobě slinutých karbidů typu H byla použita velmi jemná, „lehká“ kyselina wolframová o zrnitosti  $0,5 \div 1,0 \mu\text{m}$ , zatímco pro výrobu karbidu G1 a slinuté karbidy s hrubším zrnem se používá tetrahydrát hydrogenwolframanu dekaamonného tzv. „těžká“ kyselina wolframová. Dále se řídila podmínkami redukce (teplotou nauhličování a teplotou konečné fáze slinování). Přísada 0,1 % VC do standardního materiálu N snižuje velikost zrna z  $1 \div 7 \mu\text{m}$  na hodnoty  $0,5 \div 2,0 \mu\text{m}$  (při slinovací teplotě 1 500 °C). Tato redukce se provádí v rotačních trubkových pecích.

Počáteční produkce slinutých karbidů v Rakousku a Německu rostla velice rychle, o čemž svědčí tyto údaje: 1930 – 12 tun za rok, 1936 – 48 tun za rok, 1944 – 500 tun za rok. Podíl Widia H1 (jemného) doslova v období 1939 až 1945 asi 15% celkové produkce. Podíl tzv. speciálních druhů včetně H2 byl asi 10%. V obou zemích byly normalizovány slinuté karbidy podle firmy Krupp Widia. Od roku 1935 se slinuté karbidy vyráběli prakticky po celém světě (Německu, Rakousku, Švédsku, Japonsku, USA atd.). Mimo firmu Krupp Widia nikdo nevyráběl jemnozrnné materiály. Průběh druhé světové války (1939 až 1945) donutil šetřit wolframovými materiály a jejich maximální využití pro všechny vyráběné slinuté karbidy. Tímto krokem výzkumníci se začali věnovat vývoji slinutých karbidů, které neobsahují wolfram. Konec války vedl k dramatickému poklesu slinutých karbidů. Výrobcům slinutých karbidů přinesl řadu „nepříznivých“ let. Později se uchopily výzvy zajišťovat řezné materiály pro nové nástroje na obrábění. [2, 3]

Výroba dalších slinutých karbidů u dalších firem po celém světě vycházela z německých patentů na karbidy typu WC-Co. Na začátcích se vyráběly karbidy s obsahem  $4 \div 13 \%$  Co (Vimet – Velká Británie, Carboloy – USA). Vzhledem k právům (patentovým), byl vývoj v USA osobitý. V roce 1930 byl vyroben materiál na bázi TaC + Ni (87% + 13%) s pojmenováním Ramet. Materiál Ramet má vyšší odolnost než slinuté karbidy typu WC-Co, proto používal na výrobu nástrojů pro obrábění ocelí. V začátcích

výroby měl Ramet vysokou pórovitost na rozdíl od SK typu WC-Co, tento nedostatek se podařilo zanedlouho odstranit. Avšak Ramet byl později nahrazen karbidem na bázi WC a TaC s pojivem Co + Ni. Ramet byl používán v USA, kde měl později široké uplatnění.

Roku 1946 aplikovala firma Societe Le Carbone-Lorraine (Francie), britský patent s přísadou chromu a vanadu do SK (slinutých karbidů) kvůli řízenému růstu zrna při slinování.

Přestože základní řešení problematiky byla objevena v Německu, mnoho dalších objevů bylo učiněno i v USA, Švédsku a dalších zemích. Vzhledem k patentům a strategické povaze wolframu probíhal vývoj dvěma směry. Produkce materiálu na bázi WC (tab. 1.) a produkce bez materiálu na bázi WC nazývány jako „cermety“, které tvoří samostatnou skupinu nástrojových materiálů. [2]

Jedním z významných mezníků vývoje jsou považovány jemnozrnné materiály, které objevily na konci 60. let minulého století. Obsahovaly jemnozrnná a rovnoměrná karbidická zrna a střední velikost karbidických zrn (prvních druhů) byla menší než 1  $\mu\text{m}$ . Pro srovnání u běžných karbidů bylo zrno s velikostí 2÷3  $\mu\text{m}$ , nejnovější zrna mají velikost zrna pod 0,5  $\mu\text{m}$ . K výhodám jemného zrna patří vyšší pevnost bez snížení tvrdosti. [2]

V letech 1967/68 překvapil nováček v oboru, firma Du Pont de Nemours (USA), přivedla na trh mikrozrný SK „Baxtron“. V důsledku velmi obtížné výroby a vysoké ceny se tento materiál na trhu dlouho neudržel. Výrobu jemnozrnných materiálů provozovaly i firmy V. R. Wesson a Walmet v USA. [2]

Na trh uvedla firma Wimmet (Velké Británie) v letech 1972/1973 nové submikrometrové materiály Wimmet 10F (10% Co + 0,50 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). Zrnitost se pohybovala v rozmezí 0,5÷0,9  $\mu\text{m}$ , s nahodilými zrny velikosti 1,0÷1,5  $\mu\text{m}$ . Pórovitost a pevnost byla zlepšena vysokoteplotním izostatickým lisováním (HIP). [2]

Firma Sumitomo (Japonsko) vyrobila v roce 1973 superjemnozrnné SK s zrnitostí 0,5÷0,7  $\mu\text{m}$ , bez obsahu zrn nad 1,0  $\mu\text{m}$ . Značené N70-F0 (5 % Co + 1,0 % inhibitoru TaC+Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>), N70-F1 (8,5 % Co + 1,5 % inhibitoru TaC+ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) a N70-A1 (13 % Co + 1,0 inhibitoru TaC+ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). Určití japonští výrobci ke konci desetiletí nabízeli



ultra jemné materiály např. Mitsubishi UF10, UF20, Toshiba Tungaloy UM, Tokyo Tungsten. Žádný jiný dodavatel tyto materiály nenabízel. [2]

Na konci devadesátých let minulého století bylo stále více jemnějších prášků, a proto začalo mnoho firem hledat nové způsoby výroby tříděných prášků v několika stupních. Výsledkem tohoto snažení byly submikrometrové a ultrajemné prášky. Reaktivní rozstřikování (reaction spray proces) bylo jedním z nich. Zakládal se na zpracování vodního roztoku kovových solí. Atomizovaný roztok byl vstřikován do horké reakční komory, ve které se vypařoval a vytvářel jemné solné částice. Tyto částice jsou následně v komoře redukovány proudícím vodíkem. Kovové částice se následně hromadí na dně komory, odkud byly vyjímány.

Dosažení řízeného obsahu uhlíku je jedním z nejdůležitějších přínosů vývoje SK. Stechiometrický obsah uhlíku v karbidu wolframu je 6,12%. Blíží-li se obsah uhlíku k uvedené hodnotě, má SK normální strukturu, která obsahuje WC a gama fázi (Co). Požadovanou normální strukturu měl výrobek o obsahu uhlíku WC až do 60. let 20. století řízen s přesností 0,1%. Později v 60. letech se však zjistilo, že obsah uhlíku velmi ovlivňuje vlastnosti jako tvrdost a ohybová pevnost i v případě, že SK vykazuje normální strukturu. Proto bylo zpřísněno rozmezí přesnosti. V současné době je rozmezí od 0,02 do 0,03 %. [2]

Historie výroby SK trpí nedostatkem norem, který je zapříčiněn utajováním a rozdrobováním výroby. Snad s výjimkou období 2. Světové války (1939÷1945), kdy byla produkce přísně normalizována. Neexistovaly žádné průmyslové normy pro složení a vlastnosti. Podle německých válečných norem se ve skutečnosti dlouhou dobu používaly, protože normy publikované po válce z těchto norem vycházely. Tyto normy silně ovlivnily i pozdější německé normy, které se zakládaly spíše na aplikacích než na složení a vlastnostech SK. Tento princip byl převzat do současného označování dle ČSN ISO 513. Uvedená norma specifikuje použití SK v jednotlivých základních skupinách: P- pro obrábění železných kovů s dlouhou třískou, M- pro obrábění železných kovů s dlouhou nebo krátkou třískou a neželezných kovů a K- pro obrábění železných kovů s krátkou třískou, neželezných kovů a nekovových materiálů. Kontrolovat vlastnosti nebo složení není proto možné. Pokud výrobce tvrdí, že jim vyrobený druh slinutého karbidu odpovídá této normě, má pravdu a nelze mu toto tvrzení vyvrátit.

V současnosti dnešní výrobci zařazují SK i do nových skupin dle ČSN ISO 513: N- pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, hořčíku a mědi, obrábění plastů, kompozitů a dřeva, S- pro obrábění slitin titanu a žárovevých slitin na bázi niklu, kobaltu nebo železa a H- pro výrobu zušlechtěných a kalených ocelí a obrábění tvrzených slitin.

Řezný nástroj byl zprvu tvořen pájením destičky SK do ocelových držáků. Změna upevnění nastala z pájeného spoje na konstrukci s mechanickým upínáním v polovině 50. let, v současné době má drtivá většina nástrojů mechanicky upínanou vyměnitelnou břitovou destičku. Patent na mechanické upínání získal Američan, McKenna v roce 1948. Přejchod z pájených destiček na vyměnitelné je považován za první z novodobých „revolucí“ vývoje řezných nástrojů. Za druhou je považován objev a rychlý rozvoj povlakovacích technologií. [2]

Historický vývoj slinutých karbidů	
Rok	Nový materiál, technologie
1923-25	WC-Co
1929-31	WC-TiC-Co
1930-31	WC-TaC(VC,NbC)-Co
1933	WC-TiC-TaC(NbC)-Co
1938	WC-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -Co
1947-70	Submikrometrové WC-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -Co
1956	WC-TiC-Ta(Nb)C-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
1959	WC-TiC-HfC-Co
1965-75	Vysokoteplotní izostatické lisování (HIP), SK pod obchodním označením Keziz, firma Kebbanetal
1965-78	TiC, TiN, Ti(C,N), HfC, HfN, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CVD povlaky na slinutých karbidech WC-Co
1968-69	WC-TiC-TaC(NbC)-HfC-Co, WC-TiC-NbC(TaC)-HfC-Co
1969	CVD povlak TiC na vyměnitelné břitové destičce, firma Sandvik Coromant
1969-71	Termochemické povrchové kalení
1969-79	Komplexní karbidy s přísadou Ru
1971	CVD povlak Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Lux a spoluracovníci
1972	Submikrometrový slinutý karbid WC-Co, firma Wimet, Velká Británie
1973	Vícevrstvý CVD povlak TiC+Ti(C,N)+TiN, Schintlmeister
1973-78	Vícevrstvé povlaky (karbidy, karbidonitridy/nitridy, vícenásobné karbidy/karbonitridy/nitridy/oxidy)
1974-77	Vrstvy polykristalického diamantuna slinutých karbidech na bázi WC-Co
1978	PVD povlaky TiC a TiN (iontová implantace), firma Sumitomo
1981	Vícenásobné tenké povlaky typu Al(O,N)
1987-89	PVD povlaky TiAlN
1992-96	PACVD povlaky, CVD diamantové povlaky
1995	Funkčně gradientní slinuté karbidy (gradientní struktura), Japonsko
1995-96	CVD povlaky kubického nitridu boru - laboratorní vývoj

Tab. 1 - Historický vývoj SK [2]

### 2.2.2. Nepovlakované slinuté karbidy

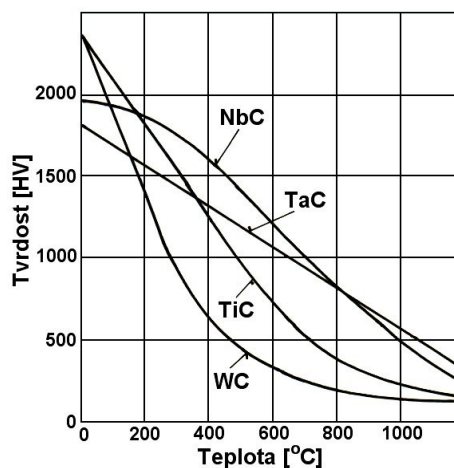
Nepovlakované SK jsou dle ČSN ISO 513 označovány písmeny HW a HF a dle užití rozděleny do šesti skupin – P, H, K, S, N a M. Skupina P značená modrou barvou, skupina H tmavošedou barvou, skupina K červenou barvou, skupina S hnědou barvou, skupina N

zelenou barvou a skupina M značená žlutou barvou. Tyto skupiny mají podskupiny např. M10, M15, P10, P15 atd. Obsah pojícího kovu se zvyšuje s rostoucím číslem. Roste i houževnatost, pevnost v ohybu a naopak klesá tvrdost a otěruvzdornost. Doporučení řezných podmínek z hlediska rostoucího čísla, klesá řezná rychlost a roste rychlost posuvu a průřez odebírané třísky. [2, 3]

Pro výrobu všech druhů SK je WC (karbid wolframu) je pojícím prvkem Co (kobalt) a jako další prvky jsou používány karbidy titanu, tantalu, niobu a chromu (TiC, TaC, NbC a Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>). Slinuté karbidy jsou také označovány jako jednodobidové (K), dvojkarbidové (P) a vícekarbidové (M). Obvyklé složení skupin:

- Skupina K: WC (87÷92 %) + Co (4÷12 %) + (TaC.NbC)
- Skupina P: WC (30÷82 %) + TiC (8÷64 %) + Co (5÷17 %) + (TaC.NbC)
- Skupina M: WC (79÷84 %) + TiC (5÷10 %) + TaC.NbC (4÷7 %) + Co (6÷15 %)

Přidání menšího množství kovů (0,5÷3,0 % V, Nb, Ta...) nebo karbidů (VC, NbC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>...) do práškové směsi, zajistí zpomalení růstu zrna WC. Karbid má ve výsledku jemnější zrno a vyšší tvrdost a pevnost (negativním jevem je snížení houževnatosti). Závislost tvrdosti karbidu na teplotě je vyobrazeno na obrázku č. 5.



Obr. 5 - Závislost tvrdosti karbidů na teplotě [2]

Skupina **K**, je určena především pro šedé litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály. Vytvářejí krátkou drobnou třísku. Řezné síly jsou relativně nízké. Přitom převládá abrazní a adhezní opotřebení. Karbid wolframu (WC) tvoří jedinou tvrdou složku těchto SK. Za pokojové teploty je její tvrdost srovnatelná s většinou ostatních karbidů

(tabulka 2.), ale s rostoucí teplotou klesá její hodnota rychleji než u jiných karbidů. Pro tuto skupinu není vhodné obrábět materiály, co tvoří dlouhou třísku. Dlouhá tříska více tepelně zatěžuje čelo nástroje. [2, 3]

Skupina **P** je pro obrábění materiálů, které vytváří dlouhou třísku, jako např.: uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Řezný proces je doprovázen obvykle značným opotřebením na čele (výmol) a velkými řeznými silami, proto skupina **P** obsahuje větší množství TaC a TiC. Tyto prvky zlepšují odolnost proti vytváření výmolů v místě styku s odcházející třískou (odolné proti difuzi za vysokých teplot). Výhody skupiny **P** pro obrábění materiálů, je dána vyšší tvrdostí TiC za vyšších teplot ve srovnání s WC. Nevýhoda této skupiny však spočívá ve vyšší křehkosti a nižší odolnosti než u WC. [2, 3]

Univerzální použití má skupina **M** a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako např.: lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvářené litiny. Dochází k vydrolování a řezné síly dosahují středních až vysokých hodnot. [2, 3]

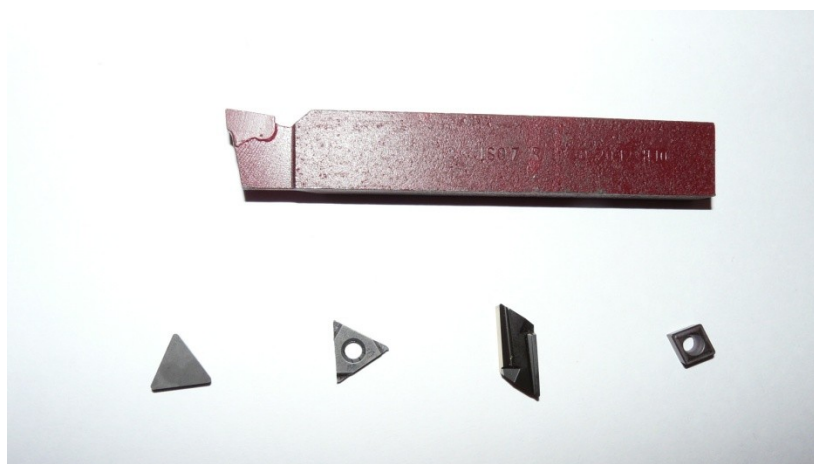
Ze skupin slinutých karbidů **K**, **P** a **M** je využíván pouze omezený počet druhů pro lehké a dokončovací obrábění (vysoká řezná rychlost  $v_c$ , nízká posuvová rychlost  $v_f$  a šířka záběru ostří  $a_p$ ). Pro střední a těžké obrábění nebo hrubování se používají druhy s vyšším číselným označením (z důvodů své nízké tvrdosti nemohou být použity při vysokých řezných rychlostech, ale s vyšší houževnatostí umožňuje užití pro vyšší posuvové rychlosti a větší šířky záběru ostří). Tyto druhy s vyšším číslem lze užít také při frézování a vrtání. Při řezání nepřerušovaném jsou slinuté karbidy s nižším obsahem pojící fáze s lepší řezivostí vzhledem k větší odolnosti proti plastické deformaci (skupiny s nižším číselným značením). [2, 3]

Vlastnosti karbidů a nitridů							
Vlastnost		WC	TiC	TiN	TaC	NbC	HfC
Typ mřížky		H	KPLS				
Parametr mřížky [nm]	a	0,2900 až 0,2907	0,43200 až 0,43316	0,423 až 0,424	0,4450 až 0,4455	0,424000 až 0,447095	0,4460 až 0,4636
	c	0,2830 až 0,2864	–	–	–	–	–
Měrná hmotnost [g.cm <sup>-3</sup> ]	t	15,67	4,939	5,432	14,495	7,798	12,76
	s	15,70 až 15,80	4,91 až 4,93	5,213 až 5,430	14,40 až 14,50	7,78 až 7,85	12,30 až 12,67
Tvrdość [GPa]		20,8 až 22,00	28 až 35	18,0 až 29,5	16,7 až 25,0	19,65 až 24,00	26,1 až 27,0
Modul pružnosti v tahu [GPa]		620 až 727	269 až 510	251 až 600	285 až 560	338 až 580	317 až 510
Modul pružnosti ve smyku [GPa]		262	186	–	214	–	193
Modul objemové pružnosti [GPa]		–	240 až 390	–	414	–	241
Pevnost v tahu [MPa]		350	–	–	–	–	–
Pevnost v ohybu [MPa]		550 až 560	240 až 400	–	350 až 400	300 až 400	–
Poissonovo číslo [-]		0,18	0,191	–	0,24	–	0,18
Koificient tření proti oceli [-]		–	0,23 až 0,25	0,20 až 0,30	–	–	–
Teplota tavení [°C]		2627 až 2870	3160 až 100	2950 až 50	3540 až 3983	3490 až 3600	3890 až 150
Bod varu [°C]		–	4300	–	5500	–	5400
Součinitel délkové roztažnosti [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	a	4,42 až 5,20	6,52 až 8,60	9,30 až 9,35	6,29 až 6,60	6,52 až 6,90	6,27 až 6,80
	c	7,3	–	–	–	–	–
Měrná tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]		63,0 až 121,8	21	19,2 až 29,4	22,0 až 22,2	14,2 až 30,0	20,0 až 22,0
Měrný odpor [mΩ.cm]		17 až 53	50 až 68	25	25	35	37 až 45
Pozn.: 1) H - hexagonální, KPLS - kubická, plošně středěná; 2) t - teoretická, s - skutečná							

Tab. 2 - Vlastnosti karbidů a nitridů [2]

Vlastnosti karbidů a nitridů (pokračování)						
Vlastnost		HfN	VC	ZrC	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Mo <sub>2</sub> C
Typ mřížky		KPLS				
Parametr mřížky [nm]	a	0,451 až 0,452	0,4159 až 0,4170	0,4670 až 0,4698	1,146 až 1,147	0,3000 až 0,3007
	b	—	—	—	0,5520 až 0,5545	—
	c	—	—	—	0,282 až 0,283	0,4734 až 0,4729
Měrná hmotnost [g.cm <sup>-3</sup> ]	t	13,94	5,71	6,56	6,66	9,18
	s	13,80 až 13,84	5,36 až 5,77	6,59 až 6,66	6,68 až 6,74	9,06
Tvrdość [GPa]		16 až 20	27,2 až 29	25,5 až 29,5	13 až 18	15 až 24,5
Modul pružnosti v tahu [GPa]		—	422 až 430	348 až 440	373 až 400	228 až 535
Modul pružnosti ve smyku [GPa]		—	157	172	—	—
Modul objemové pružnosti [GPa]		—	390	207	—	—
Poissonovo číslo [-]		—	0,22	0,191	—	—
Teplota tavení [°C]		3330 až 3928	2648 až 3327	3260 až 3540	1800 až 1895	2485 až 2690
Bod varu [°C]		—	—	5100	—	—
Součinitel délkové roztažnosti [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	a	6,9	7,2 až 7,3	6,1 až 7,3	8 až 10,4	4,9
	c	—	—	—	—	7,9 až 8,2
Měrná tepelná vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]		21,7	38,9	20 až 20,5	19	21,5
Měrný odpor [mΩ.cm]		33	60	45 až 55	75	71
Pozn.: 1) H - hexagonální, KPLS - kubická, plošně středěná, OR - ortorombická (kosočtvercová); 2) t - teoretická, s - skutečná; 3) fáze stabilní za pokojové teploty, existuje ještě fáze Mo2C s ortorombickou mřížkou, ktrá je stabilní pouze nad teplotu 1 475 °C						

Tab. 3 - Vlastnosti karbidů a nitridů (pokračování) [2]



Obr. 6 - Nepovlakované karbidy

### 2.2.3. Povlakované slinuté karbidy

Jedno z nejdůležitějších vývojů v průmyslu slinutých karbidů během 20. Století lze zařadit vznik výroby vyměnitelných destiček s tenkými povrchovými vrstvami TiC (1969). Technika těžkotavitelných karbidů spočívala vyloučením komponentů (obou) z plynné fáze, která je známá od roku 1890. Touto technikou byly v USA pokusy na výrobu zářivek. Účelem bylo ochránit žhavící vlákno těžkotavitelnou sloučeninou a tím by se zvýšila svítivost. Ve 20. a 30. letech minulého století byl výzkum velice intenzivní v oblasti povlakování, ale nepodařilo se připravit žádné povlaky s technickou využitelností. Až v roce 1950 německý podnik Metallgesellschaft AG použil znovu zmíněnou metodu na otěruvzdorné povlaky na oceli. Výzkum uspěl a v roce 1952 vedl k první sérii patentovaných aplikací v dané oblasti. Patent povlakování vrstvou TiC na slinutých karbidech byl přihlášen roku 1959. Povlakování se tímto krokem stalo významnou metodou pro zlepšení vlastností pro řezné nástroje (nejvíce u vyměnitelných břitových destiček). V současnosti u povlakovacích technologií, s ohledem na vzájemnou kombinaci podkladového materiálu a druhu konkrétního povlaku jsou obecné možnosti vyjádřeny v tabulce 4. Z tabulky lze vyčíst, že největšího pokroku bylo dosaženo u povlakování slinutých karbidů. [2]

Možné kombinace materiálů podklad - povlak					
Podklad	Povlak				
	Kovy	Nitridy	Karbidy	Oxidy	Boridy
Keramika, sklo	°	•	°	•	
Slinuté karbidy	°	•	•	•	•
Ocelové slitiny	•	•	•		°
Neželezné slitiny	°	°			•
Uhlík, diamant	°	•	°		°
Těžkotavitelné kovy	°	°	°		°
pozn.: • - již užíváno, ° - ve vývoji					

Tab. 4 - Možné kombinace materiálů (podklad – povlak) [2]

Na trhu koncem 60. let 20. století se objevily povlakované destičky ze SK od firmy Sandvik Coromant. Povlak (TiC) měl tloušťku vrstvy 4÷5 μm. Brzy po tomto objevu se vyvinuly povlaky typu TiCN a TiN. Povlak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> přišel na trh až v polovině 70. let.



Povlaky byly vytvářeny metodou Chemical Vapour Deposition (chemické napařování), která má zkratku CVD (patentováno – Hitermannem, Swedlerem a Rupertem ve Švýcarsku). Mohly být jednovrstvé nebo i vícevrstvé povlaky. Povlak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  požadoval tvorbu mezivrstev, aby byla zlepšena pevnost (adhézní) mezi podkladem a povlakem. Dále povlaky metodou Physical Vapour Deposition (fyzikální napařování), která má zkratku PVD a objevila se na začátku 80. let.

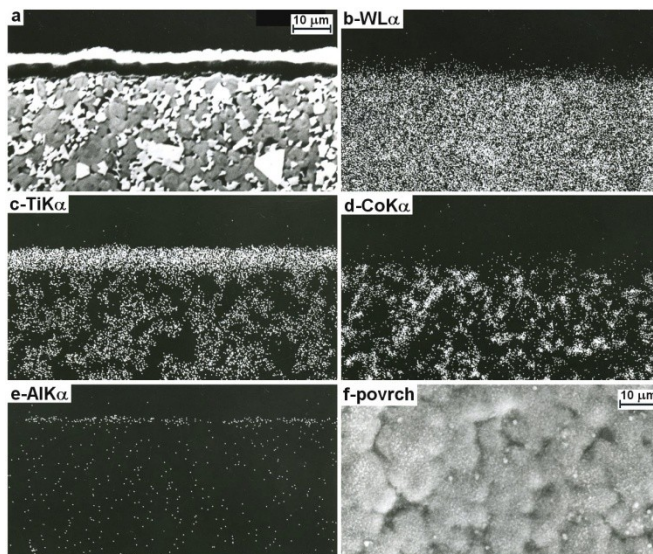
Dříve bylo dostačujících několik typů povlaků proti konkurenci jiných nástrojových materiálů. Dnes se musí každoročně vyvíjet mnoho nových druhů povlakovaných SK. Jiným druhem povlaku, tloušťkou povlaku, metodou povlakování, kombinací vrstev, substrátem atd. se liší jednotlivé materiály. Pro povlakovanou břitovou destičku řezného nástroje je velice důležitá dobrá kombinace uvedených kritérií, protože na této skutečnosti závisí efekt řezného nástroje.

Vývojové stupně povlakovaných SK se obvykle uvádějí tyto:

- 1. generace: Jednovrstvý povlak (prakticky vždy TiC) s tloušťkou přibližně 6  $\mu\text{m}$ . Špatnou soudržností povlaku a podkladu (tvorba křehkého eta-karbidu). Proto při obrábění velmi rychle docházelo k odlupování povlaku, čímž se nástroj znehodnotil.
- 2. generace: Jednovrstvý povlak (TiC, TiCN, TiN) bez eta-karbidu. Zlepšení výroby umožnilo vytvářet zrna o tloušťce 7÷10  $\mu\text{m}$ , bez nebezpečí odlupování při funkci nástroje.
- 3. generace: Vícevrstvý povlak se dvěma a více vrstvami. Mezi jednotlivými vrstvami má ostře ohraničené přechody. První vrstvy jsou nanášeny obvykle vrstvy s lepší přilnavostí k podkladu. Tyto vrstvy mají nižší schopnost odolnosti proti opotřebení. Naopak poslední vrstvy nejsou s tak dobrou přilnavostí, ale naopak mají vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení a vyšší oxidaci za zvýšené teploty. Obvyklé řazení (od podkladu) např.: TiC- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN.

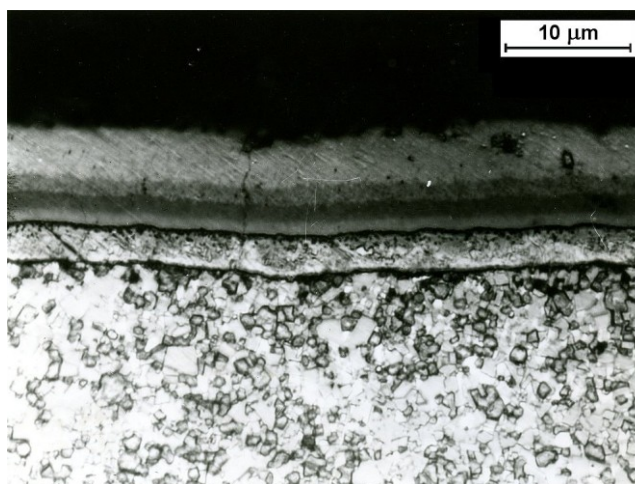
Jeden z prvních povlaků třetí generace a jeho analýza je znázorněna na obrázku č. 7. Je to povlak TiC+ $\text{Al}_2\text{O}_3$  s podkladem typu P (broušený a následně leštěný řez břitovou destičkou). Snímek „a“ se pořídil pomocí SEM s režimem obrážkových elektronů (rozlišuje lépe jednotlivé strukturní složky v podkladu, bílá- ostrohranná zrna WC a šedá- zaoblená zrna W, Ti). Snímky „b až e“ promítají plošné rozložení rentgenového záření wolframu,

kobaltu a hliníku. Snímek „f“ dokumentuje morfologii povrchu vrstvy povlaku  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (očištěný, ale neupravený povrch). [2, 3]



Obr. 7 - CVD povlak  $\text{TiC}+\text{Al}_2\text{O}_3$  na substrátu typu P [2]

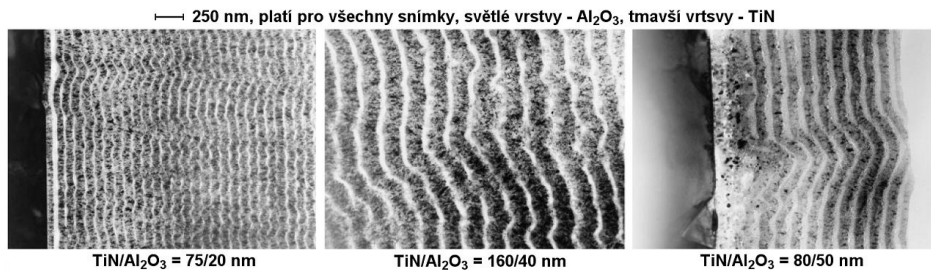
Broušený, leštěný a leptaný řez břitovou destičkou s pětivrstevným povlakem 3. generace s mezivrstvy, který odděluje samostatné vrstvy povlaku a tyto první vrstvu od podkladu je na obrázku č. 8 (optický mikroskop).



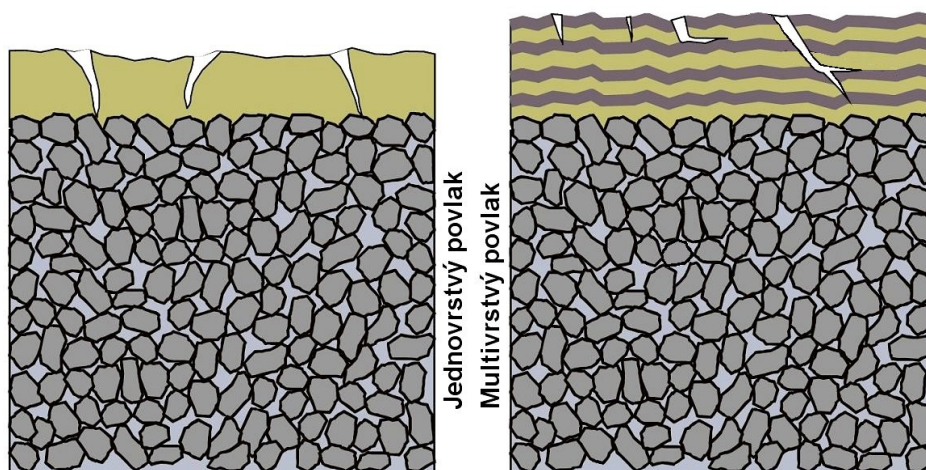
Obr. 8 - Pětivrstevný povlak 3. Generace [2]

- 4. generace: Speciální vícevrstvý, „multivrstvý“ povlak, složený často s více než deseti vrstev a mezivrstev obrázek č. 9. S různě výraznými přechody mezi vrstvami. Vrstvy jsou stejného materiálu jako u 3. generace. Povlaky multivrstvé

u metody CVD jsou vyráběny v povlakovacím zařízení. U PVD pomocí odpařování nejrozličnějších typů targetů. Výhody spočívají se schopností odklánět a zpomalovat šíření trhlin od povrchu povlaku k substrátu (obrázek č. 10.).



Obr. 9 - Multivrstvý PACVD povlak 4. generace, TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [2]



Obr. 10 - Vliv multivrstvého povlaku na šíření trhlin [2]

Za povlaky jež se považují také za 4. generaci jsou např.: diamantové, nanokompozitní, gradientní, supermřížkové a „inteligentní“ povlaky. Mezníky ve vývoji tvrdých povlaků jsou shrnuty v tabulce č. 5. Tabulka zachycuje úsilí snížit teplotu při výrobě tvrdých povlaků a zlepšit vlastnosti. Zvýšit tvrdost a odolnost proti oxidaci, která by měla, být zvýšena na hodnotu 1 000 °C. Dle tvrdosti řadíme povlaky do dvou skupin. První skupina, tvrdé povlaky s tvrdostí povlaku <40 GPa a druhá, supertvrdé povlaky s tvrdostí >40 GPa.

Důležité stupně ve vývoji tvrdých povlaků			
Povlak	Materiál	Tvrdość [GPa]	Charakteristika
Jednovrstvý	TiN, TiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21, 28, 21	CVD při teplotě kolem 1 000 °C na substrátech SK
	TiN, TiC	21, 28	PVD při teplotě ≤550 °C na ocelových substrátech
Multivrstvý	TiC/TiB <sub>2</sub>		Kolem 10 <sup>3</sup> meziřázových hranic TiC/TiB
Jednovrstvý	c-BN	50	Chemická rozpustnost boru v železe
	diamant	90	Vysoká chemická aktivita k železe
	TiAlN		Odolnost proti oxidaci až do 800 °C
	DLC	65	Amorfní fáze
	CN <sub>x</sub>	50 až 60	Substechiometrická struktura (x = 0,20 ÷ 0,35)
Supermřížkový	TiN/VN, TiN/NbN, atd.	~50	Supermřížková perioda 5 ÷ 10 nm
Jednovrstvý	nc-MN/a-nitrid		Nanokompozit M = kov
	nc-MN/M		
	Ti <sub>0,4</sub> Al <sub>0,6</sub> N	~32	Nanokompozit, odolnost proti oxidaci až do 950 °C

Tab. 5 - Důležité stupně ve vývoji tvrdých povlaků [2]

Tvrdých povlaků je velký počet na rozdíl od supertvrdých. Do supertvrdých povlaků lze zařadit nižší jen kubický nitrid boru, DLC (Diamond Like Carbon, v překladu „uhlík podobný diamantu“), amorfní nitrid uhlíku a polykrystalický diamant.

Supermřížkové povlaky se tvoří nanovrstvami. Nanovrstvi jsou složeny ze dvou různých materiálů. Vrstvy se řadí se supermřížkovou periodou. Dvojvrstvy mohou být tvořeny kovy, karbidy, nitridy nebo oxidy nejrozličnějších materiálů. Dle této dvojvrstvy se dělí povlaky do skupin:

1. Kovové supermřížky;
2. Nitridové supermřížky;
3. Karbidové supermřížky;
4. Oxidové supermřížky;
5. Nitridové, karbidové nebo oxidové supermřížky/kovové supermřížky.

Pomocí experimentu bylo prokázáno, že kovové supermřížky vykazují poměrně nízkou tvrdost, na rozdíl od jednokrystalové nitridové supermřížky, které lze zařadit do supertvrdých materiálů s tvrdostí 45÷55 GPa. Tvrdost celková, supermřížkového povlaku je vyšší než tvrdost jednotlivých složek. Zvýšení tvrdosti je velice složitým jevem. Existuje i několik modelů, které vysvětlují multivrstvé zpevnění. Model Chua a Barneta a Shinuv model. Například model Shinuv dokumentuje, že pro zvýšení tvrdosti povlaku je potřeba, aby hodnoty modulů pružnosti materiálu dvou vrstev se lišily a že koherentní napětí na fázovém rozhraní vrstev má nejmenší účinek. [2, 3]

Nanokrystalické materiály se zrnem o velikosti  $\leq 10$  nm ukazují úplně nové vlastnosti. Materiál má chování, které lze určit zejména procesy. Ty probíhají v hraničních oblastech, protože počty atomů v zrnech jsou takřka stejné nebo menší. S těmito podmínky neexistují dislokace. Hranice zrn brání jejich vytvoření a tyto hranice zrn rozhodují především o deformaci materiálu. Dislokaci nahrazuje nový mechanismus, značený jako kluz po hranicích zrn, který tedy nahrazuje dislokační aktivitu. Tyto skutečnosti vedou k novým a unikátním vlastnostem nanokrystalických materiálů. Pokud velikosti zrn klesne pod 5 nm, musí se uvážit atomární síly v materiálu a čekat na tvorbu nanokrystalických subatomárních struktur. Tyto materiály lze připravit pomocí metody magnetového práškování. [2]

V současnosti se používají jednovrstvé i vícevrstvé povlaky, dle různých způsobů a podmínek při obrábění. Materiály povlaků mají různé vlastnosti (chemické a fyzikální). Ty velmi ovlivňují odolnost proti opotřebení při užívání pro řezné nástroje. Vysoká tvrdost karbidu titanu a karbidu hafnia je známá svou výbornou odolností proti opotřebení na hřbetě. TiN a HfN má vyšší entalpii tvorby než například TiC a HfC, což znamená vyšší odolnost proti opotřebení na čele. Dále dvousložkové kombinace HfC a HfN mají téměř stejné vlastnosti jako TiC a TiN, ale tepelnou stabilitu mají lepší. TiC je nejtvrdší a má nejlepší odolnost proti abraznímu opotřebení, zato TiN je měkčí. Z toho plyne, že je méně otěruvzdorný a je termodynamicky stabilní a odolný proti výmolům na čele nástroje. Oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) má nejvyšší otěruvzdornost při vysokých teplotách, tedy při vysokých řezných rychlostech. Z těchto důvodů je vícevrstvá technologie významná pro požadované vlastnosti povlakovaných destiček SK. Prakticky u všech materiálu pro řezné nástroje jako např.: SK, cermety, řezná keramika atd. lze nanést vrstvu otěruvzdorných a tvrdých povlaků. Nejčastěji se používají vícevrstvé povlaky 3. a 4.

generace. K prvním materiálům pro jednotlivé vrstvy (TiC, TiN, TiCN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) přibývají postupem času další materiály, např.: AlCr-báze, AlCrN, HfO, WB,  $\text{SiO}_2$  atd. Ne všechny jsou vyráběny sériově a mají užití v praxi. Velkou roli při zvyšování výkonu nástrojů mají lubrikační povlaky například  $\text{MoS}_2$ , WC/C, Lubrik (materiál od firmy Pramet Tols), vytvořené metodou PVD. Jejich funkcí je snížit tření mezi čelem nástroje a odcházející třískou (nízké tepelné zatížení nástroje se projevuje zvýšením trvanlivosti řezného nástroje). Finální řezivost je závislá také na volbě vhodného substrátu břitové destičky, tloušťce povlaku, typu povlaku a na depozičních podmínkách. [1, 2]

Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů				
Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
Nejlepší	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	TiC	$\text{Al}_2\text{O}_3$
↑	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	$\text{Al}_2\text{O}_3$	TiCN
Špatná	TiC	TiC	TiN	TiC

Tab. 6 - Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů [2]

### 2.3. Technologie broušení

Broušení je dokončovací metoda obrábění rovinných, válcových nebo tvarových ploch nástrojem, jehož břity se tvoří zrna tvrdých materiálů navzájem spojených vhodným pojivem. Má vysokou přesnost a jakost povrchu. Tímto způsobem můžeme opracovávat materiály s vysokou pevností a tvrdostí jako například kalené oceli nebo keramika. Každé brusivo má odlišnou geometrii. Mezi těmito zrna a pojivem vznikají póry. Lze odebírat velmi tenké třísky (až 0,001 mm) a řezná rychlost dosahuje až 100 [m/s]. Mezi základy metody broušení patří:

- 1) Vnější broušení do kulata:
  - a) s podélným posuvem
  - b) s příčným posuvem (zapichovací)
  - c) kotoučem nastaveným na rozměr
  - d) krokové (s příčným i podélným posuvem)
  - e) bezhroté (průběžné, zapichovací, broušení na doraz)

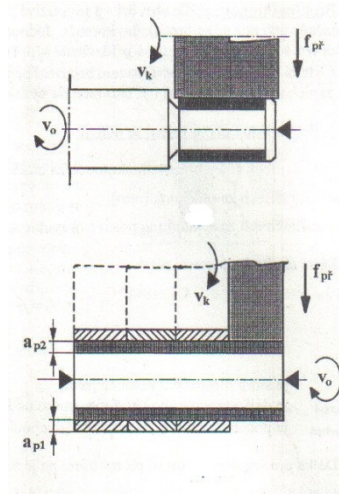


- f) bezhroté v tuhých opěrkách
- 2) Vnitřní broušení do kulata:
  - a) bezhroté
  - b) bezhroté v tlustých opěrách
- 3) Broušení na plocho (broušení rovinné):
  - a) čelem brusného kotouče
  - b) obvodem brusného kotouče

Speciálními metody broušení jsou:

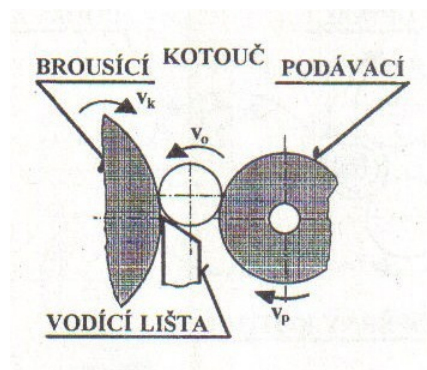
- 1) Broušení tvarových ploch
  - a) profilovými kotouči
  - b) kotouči s obvyklým tvarem
- 2) Broušení závitových ploch
  - a) jednoduchým kotoučem
  - b) hřebenovým kotoučem
  - c) bezhroté (způsob podélný nebo zapichovací)
- 3) Broušení brusnými pásy
  - a) mezi hroty
  - b) bezhroté
  - c) rovinné
  - d) otvorů
  - e) tvarových ploch
- 4) Broušení vysokými rychlostmi [4]

Válcové a kuželové plochy se brousí pomocí vnějšího broušení do kulata. Toto broušení je rozšířené nejvíce u malosériových a kusových, výroách. Pouze při speciální výbavě se dá použít i při velkosériové, výrobě. Válcová součást, která se brousí tímto způsobem, se otáčí mezi hroty většinou s užitím upínacího srdce. Naopak tvarová se upíná do čelistí a broušení se provádí ne etapy: hrubování, hlazení, popřípadě vyjiskřování. Vyjiskřováním se výrazně zlepšuje kvalita broušeného povrchu. To při hrubování jsou větší posuvy, aby byla odebrána velká část přídavku (70 až 90%) a naopak při hlazení se užívá nejmenších posuvů pro zabezpečení přesnosti geometrie a jakosti povrchu. Příklady tohoto broušení obr. č. 11. [4]



Obr. 11 - Dva příklady broušení do kulata [4]

Vnější bezhroté broušení, se obrobek v procesu broušení neupíná na vnější válcovou plochu. Vkládá se mezi dva kotouče a přidrží se vodící lištou. Jeden kotouč je brousící a druhý podávací (obr. 12). Kotouče nesmí mít stejnou rychlost, protože by broušení neprobíhalo. Proto brousící kotouč má větší průměr (většinou dvojnásobný). Rychlost dosahuje 20 až 35 [m/s]. Na rozdíl od rychlosti podávacího kotouče, zde dosahuje rychlost 0,6 až 1,3 [m/s]. Mezi obrobkem a podávacím kotoučem je třecí síla větší, než mezi brusným kotoučem a obrobkem. Obrobek se tím pádem otáčí rychlostí podávacího kotouče a zrna brusného kotouče budou řezat rychlostí rovné rozdílu rychlostí otáčení brusného kotouče ( $v_k$ ) a upravované součástky ( $v_o$ ). Tato metoda je vyobrazena na obrázku 12.

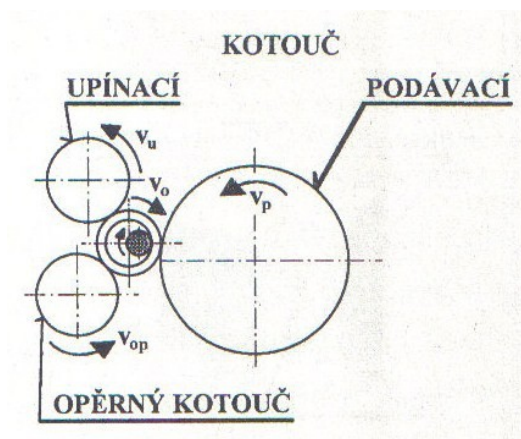


Obr. 12 - Vnější bezhroté broušení [4]

Vnitřní bezhroté broušení je založeno na stejném principu, rozdíl je pouze při upínání součástky. Podávací kotouč zajišťuje otáčení a opěrný kotouč polohu součástky. Upínací



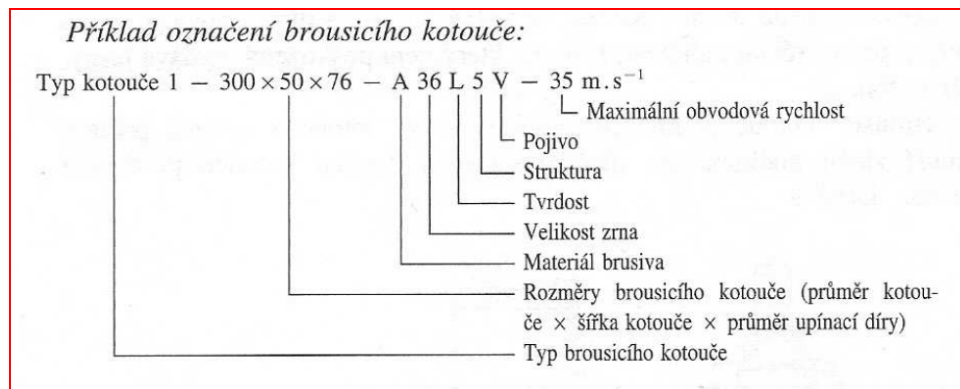
kotouč upíná (přítlačuje) po dobu broušení součástky. Tento způsob se využívá při broušení součástek, které mají vnější válcový povrch souběžný s vnitřním (obr. 13).



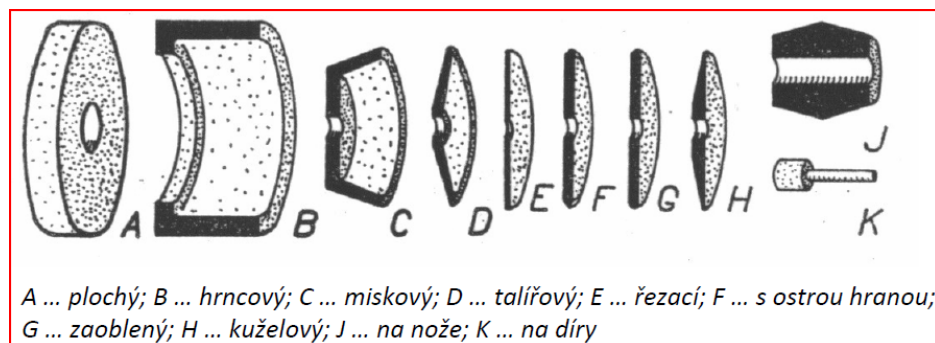
Obr. 13 - Vnitřní bezhroté broušení [4]

Broušení rovinné (na plocho), je využívána zejména jako operace na čisto po jiné úpravě (frézování, hoblování). Často také nachází uplatnění místo frézování velmi tvrdých materiálů, nebo při odstraňování tvrdé kůry materiálu. Tato kůra je nežádoucí zejména pro trvanlivost jiných řezných nástrojů než u brousících nástrojů.

Brusný kotouč (nástroj) se skládá z ostrých, tvrdých zrn a pojiva a jsou na něm uveden popis (obr. 14). Brusné zrna se získávají pomocí drcení brusných materiálů. Mezi ně řadíme např.: karbid křemíku, umělý korund, karbid bóru, diamant atd. Kotouče mají různé barvy např.: karbid křemíku má nejčastěji zelenou nebo černou a z umělého korundu je nejčastěji bílý, růžový, hnědý. Pojivo se značí velkými písmeny V, S, O, E, R, B (keramické u 90% všech kotoučů na kov, silikátové, magnezitové, šelak, pryž, umělá pryskyřice). Zato zrnitost bývá značená čísly čím menší číslo tím, je zrnitost hrubší. Tvary brusných kotoučů jsou normalizovány a vyobrazeny na obrázku 15.



Obr. 14 - Označení brusného kotouče [4]



Obr. 15 - Vyobrazení tvarů brusných kotoučů [4]

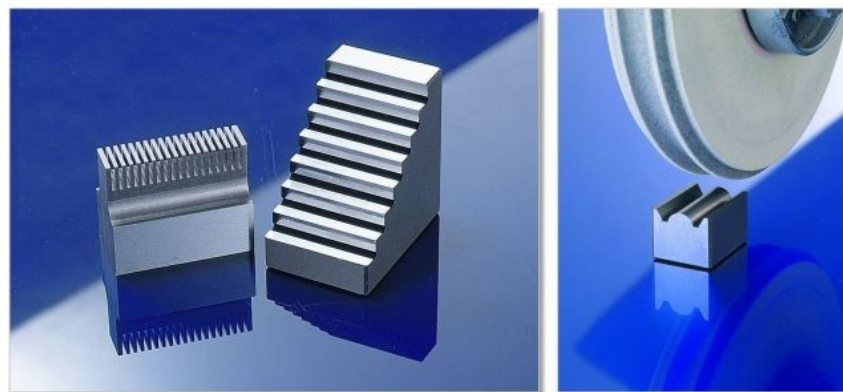
Zarovnání brusných kotoučů se provádí nejčastěji diamantovým hrotem nebo orovnávacími kolečky, na který mírně tlačíme. Kotouč má při tomto úkonu nízké otáčky. Kotouč se ostří odejmutím „vylupováním“ otupených zrn, které se provádí uvedenými nástroji. Občas se stane, že otupělá zrna se „vylupují“ sama.

Mezi speciální metody broušení řadíme:

- 1) Broušení tvarových ploch
  - a) profilovými kotouči
  - b) kotouči s obvyklým tvarem
- 2) Broušení závitových ploch
  - a) jednoduchým kotoučem
  - b) hřebenovým kotoučem
  - c) bezhroté
- 3) Broušení brusnými pásy
  - a) otvorů

- b) bezhroté
  - c) mezi hroty
  - d) rovinné
  - e) tvarových ploch
- 4) Broušení vysokými rychlostmi [4]

Broušení tvarových ploch je velmi důležité. Bez tohoto broušení by se jen těžko vyráběly součásti jako šablony, kalibry, kotoučové nože atd. Brousíme je pomocí profilových kotoučů nebo kotouči s obvyklým tvarem. Kopírovací pohyb může vykonávat jak obráběná součást, tak i brusný kotouč. Pro tvarové broušení se používá jednoduché nebo speciálně upravené kopírovací brusky, také brusky bezhroté, brusky speciální a brusky rovinné s vodorovným vřetenem. Kotouče jsou profilovány diamantem, aby byla zajištěna vysoká přesnost. Při menší přesnosti lze profilovat ocelovými kotouči. Na obrázku 16 je znázorněno tvarového broušení.



Obr. 16 - Příklad tvarového broušení [8]

Pro broušení závitových ploch se používá jednoduchých brousících kotoučů nebo brousící hřebenový kotouč. Toto broušení závitů vyžaduje vysokou přesnost. Hřebenové kotouče se užívají pro broušení krátkých závitů způsobem zapichovacím. Naopak na výrobu dlouhých závitů se využívá způsob podélného broušení. [4]

U broušení brusnými pásy bývá brusivo vázáno na textilní pás organickým pojivem. To zajišťuje i zrna a jejich spojení. Zrna se nanáší na pás v elektrostatickém poli. Tím se dosáhne stejná orientace kolmo k pásu podélnou osou. Soustava ocelových, pryžových kotoučů zajišťuje pohyb a vedení pásu. Těmito pásy lze obrábět plochy

nejrůznějších tvarů. Jeden kotouč je hnací, zbytek jsou kotouče vodící. Šířka pásu se pohybuje do 250 mm, délka pásu je v rozmezí 2 až 5m. [4]

Tabulka zachycující hodnoty drsnosti povrchu a dosahované přesnosti		
Broušení	Drsnost	Přesnost
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	IT
čelem kotouče	0,8 až 6,3	9 až 11
obvodem kotouče	0,8 až 3,2	9 až 11
čelem na čisto	0,2 až 1,6	5 až 7
obvodem na čisto	0,2 až 0,8	5 až 7
jemné broušení	0,02 až 0,4	3 až 4
bezhroté	0,8	8
Soustružení	Drsnost	Přesnost
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	IT
hrubování	12,5 až 100	11 až 14
obrábění na čisto	1,6 až 12,5	9 až 11
jemné obrábění	0,2 až 1,6	5 až 8
Frézování	Drsnost	Přesnost
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	IT
hrubování	6,3 až 25	10 až 13
obrábění na čisto	1,6 až 6,3	7 až 13
jemné obrábění	0,8 až 1,6	7 až 8
Vrtání a vyvrtávání	Drsnost	Přesnost
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	IT
hrubování	12,5 až 100	11 až 14
obrábění na čisto	1,6 až 6,3	9 až 11
jemné obrábění	0,4 až 1,6	5 až 8

Tab. 7 – Tabulka zachycující hodnoty drsnosti povrchu a dosahované přesnosti

### 3. ZBYTKOVÉ PNUTÍ A ZPŮSOBY JEHO MĚŘENÍ

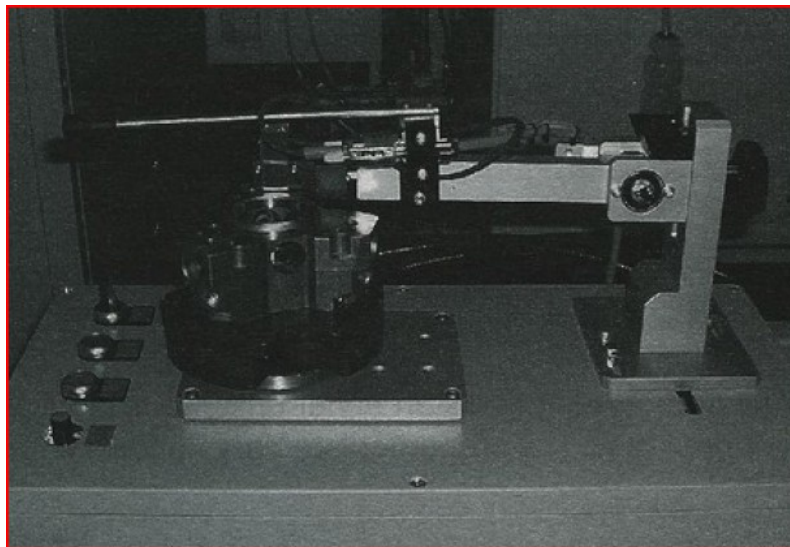
#### 3.1. Barkhausenův šum

Barkhausenův šum se dá využít ke kontrole a optimalizaci procesu broušení. Významná průmyslová odvětví od automobilového přes letecký až po kosmický průmysl používá strojní součásti jako např. ložiska, ozubená kola, klikové hřídele, vačky atd. Z tohoto důvodu je kladen vysoký důraz na kontrolu finálních operací jako broušení, tepelné zpracování a kontrola následných procesů obrábění kladen vysoký důraz, často s požadavkem spolehlivé a nepřetržité kontroly kompletní výroby. [5]

##### 3.1.1. Princip Barkhausenova šumu

Podstata Barkhausenova šumu je známa od roku 1919. Zvýšené praktické využití lze zaznamenat až v posledním čtvrtstoletí. Stručný popis jevu: Feromagnetické materiály si představíme jako systém malých magnetických oblastí podobné jako tyčové magnety, které se nazývají domény. Veškeré domény se magnetizují podél některých krystalograficky význačných směrů. Tyto domény jsou odděleny navzájem hranicemi. Hranice se nazývají doménové (Blochovy) stěny. Přitom doménové stěny se důsledkem vnějšího magnetického pole pohybují. Aby se doménová stěna mohla pohnout, doména na jedné straně se musí zvětšit a doména na druhé straně naopak smrštít. Výsledkem je změna v celkové magnetizaci vzorku. Je-li cívka z vodivého drátu umístěna v blízkosti vzorku v době, kdy se stěna pohybuje, související změna vzorku indukují v této cívkě elektrický puls. Profesor Barkhausen v roce 1919 provedl první elektrické sledování stěn. Dokázal, že magnetizační proces charakterizován hysterezní smyčkou není spojitý. Proces je tvořen malými skoky vzniklý pohybem magnetických domén v důsledku vnějšího magnetického pole. Jsou-li plusy, které vznikají pohybem domén spojeny, vznikne typický signál. Tento signál se nazývá Barkhausenův šum. Pro většinu materiálu je frekvenční spektrum Barkhausenova šumu začínající na magnetizačním kmitočtu a končící přibližně na 250kHz. Signál je tlumen exponenciálně v závislosti na hloubce, kterou musí projít uvnitř materiálu. Útlum určí hloubku, ze které je možno získat informaci. Běžně se měřící

hloubka pohybuje kolem 0,01 a 1,5 mm. Na obrázku 17. vidíme sestavu pro kontrolu tlakových čerpadel.



Obr. 17 - Sestava pro kontrolu těles tlakových čerpadel [5]

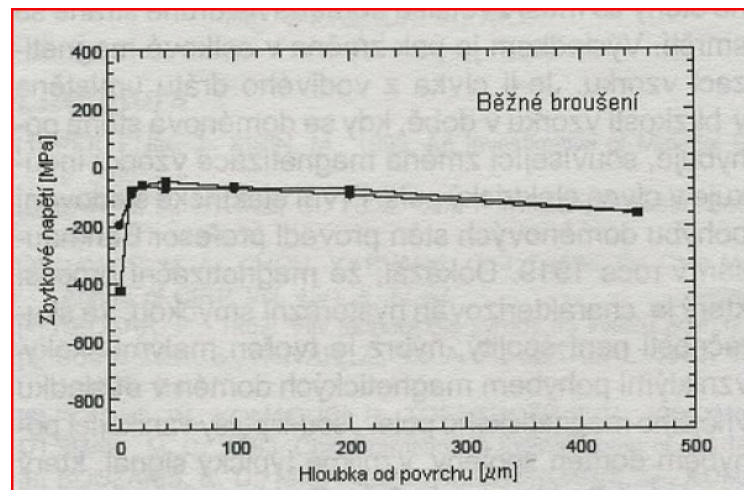
### 3.1.2. Charakteristika a možnosti zařízení

Měřicí systém (jeho uspořádání) vychází ze samostatného principu. Obsahuje generátor časové proměny magnetického pole, zařízení pro snímání odezvy vzorku a vyhodnocovací jednotku. K magnetizaci se musí použít frekvence řádu jednotek až stovek Hz. Barkhausenův šum se vygeneruje a měří v kmitočtech má rozsah až stovky kilohertzů. V průmyslu je úloha třmenu (magnetizačního) spolu se snímacím pólem a předzesilovačem soustředěna do jednotky snímače, zdroj a filtrace s vyhodnocením pak do centrální jednotky, ale pro některá speciální užití jako jsou například ložiska, je část senzoru pro snímání oddělena od třmenu. V průmyslu jsou aplikace metod Barkhausenova šumu přizpůsobeny konkrétním výrobkům. Proto je normální mít speciální systém například pro výrobu ložisek nebo váček atd. [5]

### 3.1.3. Vznik spálenin po broušení

Broušení je technologie, která se používá při výrobě součástí s požadavkem na vysokou přesnost ve srovnání s jinými procesy obrábění. Broušení požaduje vysokou energii na plochu pro odstranění materiálů. Většina energie se přemění na teplo

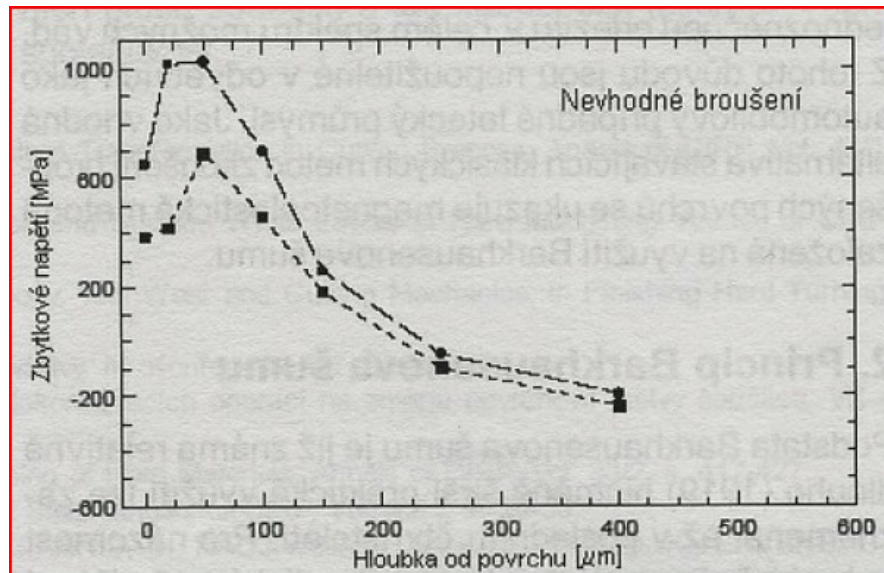
a je soustředěna do povrchových vrstev obrobku. Na faktorech: chladicí kapaliny, typu kotouče, metody broušení, rychlosti a hloubce broušení je závislá okamžitá teplota. Kvůli životnosti součásti je vhodné dbát na povrchových vrstvách, aby byla určitá úroveň tlakových napětí. Tlakové napětí, které se vnáší pomocí chemicko-tepelného zpracování nebo kuličkování. Při optimálním nastavením u broušení je část tlakových napětí redukována (pouze část). Hloubkový profil je zobrazen na obrázku 18.



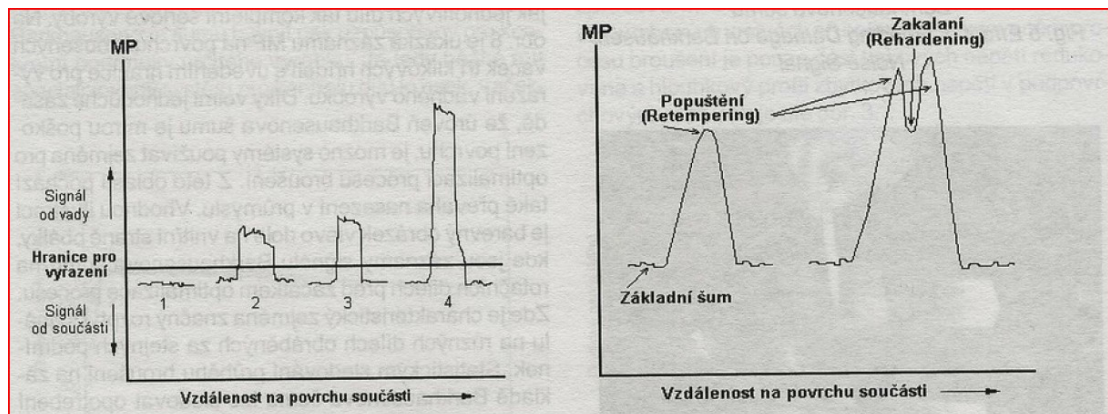
Obr. 18 - Běžné broušení (profil zbytkového napětí) [5]

Hrozivé následky pro materiál a jeho únavovou odolnost může nastat při přestření například u odvalovací frézy. Tyto poškození je závislé na lokální teplotě v daném místě povrchu. Při nárůstu teploty přibližně na 500 °C je následek v podobě částečné relaxaci tlakových napětí (bez viditelné změny mikrostruktury). Zvýšením teploty nad 600 °C (nad popouštěcí) má následek vznik spálenin typu B (obr. 19). Sníží se povrchová tvrdost a vzrostou tahové napětí. Při dalším zvyšování až nad teplotu 720 °C a okamžité chlazení pomocí kapaliny (chladicí), která způsobuje vznik spálenin typu D obsahující nepopuštěný martenzit. Vztah tvrdosti, zbytkových napětí a hodnoty Barkhausenova šumu vyobrazuje obrázek 18. Pokles povrchové tvrdosti je nežádoucí a má za následek zvýšení Barkhausenova šumu. Přitom podobně roste i signál s růstem zbytkových napětí. Spojením těchto závislostí se dozvídáme, že výška barkhausenova šumu reflektuje stupeň poškození daného povrchu. Pro ukázkou jsou na obrázku 20. uvedeny typické vady pomocí Barkhausenova šumu (MP). [5]





Obr. 19 - Nevhodné broušení (profil zbytkového napětí) [5]



Obr. 20 - Typické vady promítnuty pomocí Barkhausenova šumu [5]

### 3.1.4. Zhodnocení Barkhausenova šumu

Zařízení je vhodné pro kontrolu vlastností materiálu. Je výbornou náhradou pro detekci brusných spálenin používaných v praxi. Metoda nabízí mnoho výhod: vysokou citlivost, opakovatelnost, spolehlivou odezvu. Je tu i možnost stupně automatizace. Lze nasadit jak v kusové tak i v sériové výrobě. Tato metoda umožňuje širší uplatnění v praxi než detekce brusných spálenin. BŠ lze použít ke kontrole procesů obrábění, tepelného zpracování nebo k nedestruktivnímu stanovení vlastností jako tvrdost nebo zbytková napjatost feromagnetických materiálů.

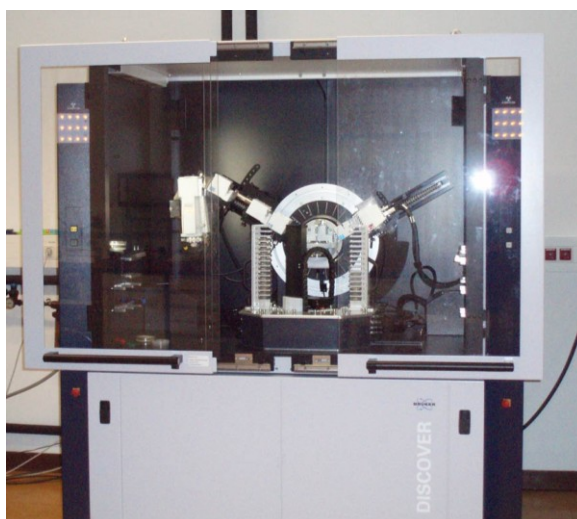


### 3.2. Jiné metody měření pnutí

Pro stanovení vnitřního pnutí lze použít i jiné metody měření. Lze je rozdělit na metody rentgenografické, magnetické a mechanické.

#### 3.2.1. Rentgenografická metoda

U rentgenografických metod je umožněno stanovit všechny tři druhy pnutí. Zjišťují se zde změny mřížkové struktury v kovu vyvolané vnitřním pnutím. Nevýhodou metody je složitost zařízení pro záznam rentgenových difrakcí. Vzhledem ke složitosti se v praxi využívají hlavně na vědeckých výzkumech (obr. 21) [6]



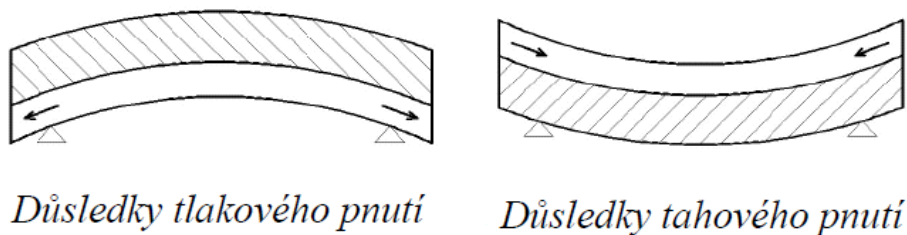
Obr. 21 - Laboratorní difraktometr

#### 3.2.2. Magnetická metoda

U magnetické metody spočívá princip ve vnitřním napětí určitého povlaku vyloučeného na slitině s vhodnými vlastnostmi (magnetostrikční), které vyvolají tahové nebo tlakové pnutí. Tato pnutí mění původní vlastnosti (magnetické). Smysl a velikost těchto napětí se charakterizují změnami v průběhu hysterezní smyčky. Metoda je poměrně jednoduchá. Velkou nevýhodou této metody je, že zkoumaný vzorek musí být vyroben z určité slitiny. [6]

### 3.2.3. Mechanická metoda

Mechanické metody vnitřního pnutí prvního druhu má pro aplikace elektrolytického vylučování při vytváření vrstev kovů velký význam. Vnitřní pnutí a jeho hodnoty umožňuje odhad určitých mechanických vlastností (povlaku). Tahový charakter ovlivňuje odolnost proti oděru a tlakový ovlivňuje pevnost. Vyšší tahový charakter znamená vyšší odolnost proti oděru. Makropnutí lze určovat měřením deformací (vznikajících vlivem axiálních sil), na rozdíl od pnutí druhého a třetího druhu. Mezi druhy měření makropnutí řadíme průhyb katody. Jde o měření jednostranně pokovovaného pásu. Ten je na jednom konci upevněn. Tahové pnutí u této zkoušky se projevují odklonem od podložky, tlakové se projevují ohybem pásu směrem k anodě. Průhyb pásu se zajistí buďto: opticky, pneumaticky nebo elektronicky. Přesnější metoda je měření za pomoci spirální kontraktometrem. Princip je totožný jako u katod, pouze pásek je stočen do spirály. [6]



Obr. 22 - Důsledky tlakového a tahového pnutí [6]

#### 4. NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ PRO KONKRÉTNÍ PŘÍPAD

Měří se slinuté výrobky od firmy Pramet Tools. Tyto výrobky byly vyhotoveny pro experimentální pokus na měření zbytkového pnutí po broušení VBD.

Pro měření vzorků, které jsou vyrobeny ze slinutého karbidu, jsem se rozhodl zvolit měření Barkhausenovým šumem. Tato metoda je nedestruktivní, a proto výhodná do budoucnosti pro firmu Pramet tools.

První pokusy měření výrobků ze slinutého karbidu nedopadly dobře. Vzorky byly neměřitelné pro malou magnetizaci. Měření vykazovalo minimální změny hodnot. Na tuto situaci se reagovalo zvýšením kobaltu (tedy magnetizace). Konkrétní vzorky vyhotovila firma Pramet tools. Vzorky byly slinovány za teploty 1380 °C a chemické složení vzorků odpovídalo 75% WC a 25% Co. Toto složení zaručovalo dostatečnou magnetizaci vzorku. Vzorky jsou vyfoceny na obrázku 23 a odpovídají rozměrům: Ø37 - 9 mm. Slinované vzorky byly následně broušeny na stroji WBM 221 od firmy Winterthur technology group ze Švýcarska. Broušení probíhalo mezi dvěma brusnými kotouči za těchto řezných podmínek:

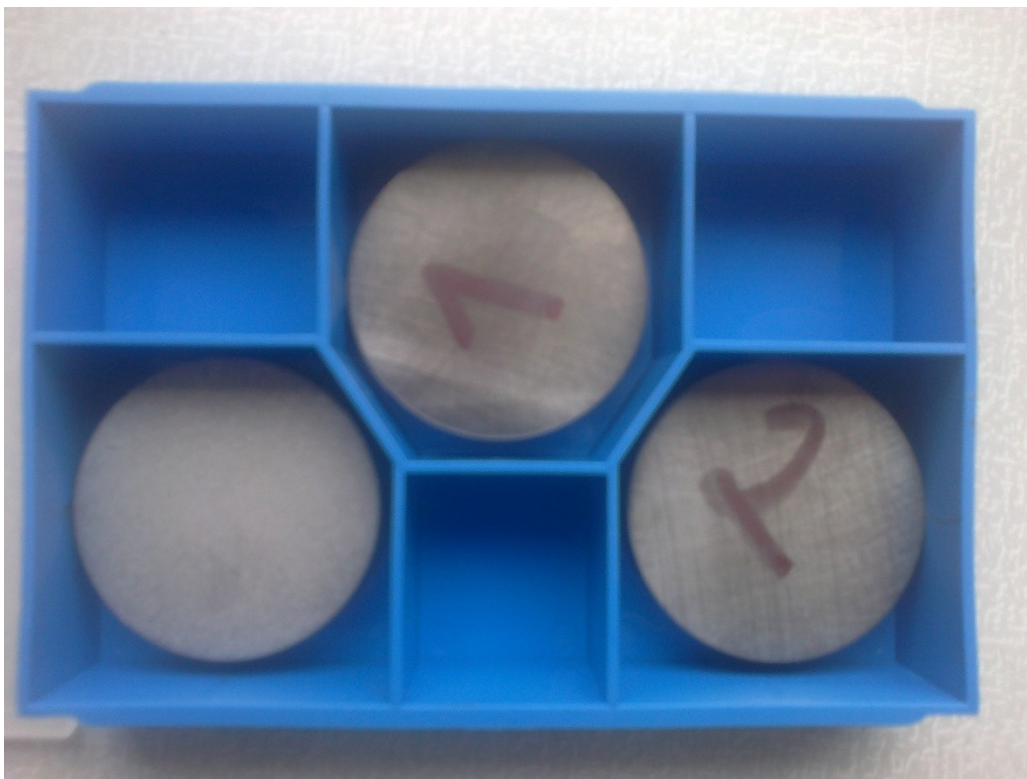
- rychlost broušení  $V_c = 7 \text{ m/s}$
- posuvem  $f = 1 \text{ mm/min}$
- při použití chlazení

Broušení bylo uskutečněno pomocí nástroje s následujícími parametry:

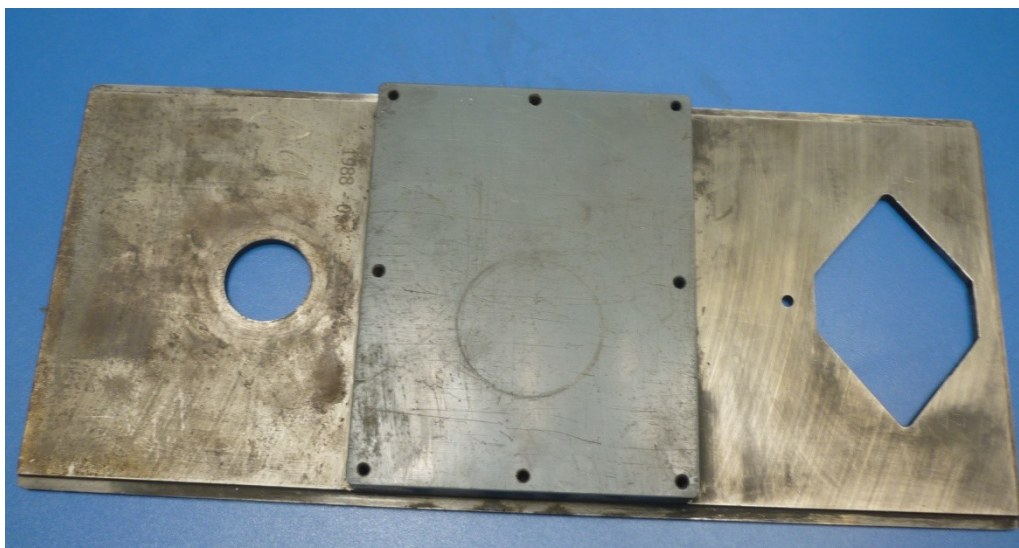
- dia kotouč
- zrnitost D126
- koncentrace K100
- vazba B1

Vzorky při broušení jsou vloženy do takzvaných brusných klecích. Klec, ve které byly broušeny vzorky, jsou vyfoceny na obrázcích 24. a 25. Broušení vzorků V1 a V2 bylo provedeno za identických podmínek. Pouze vzorek V1 byl broušen jako 1 kus pro oživení

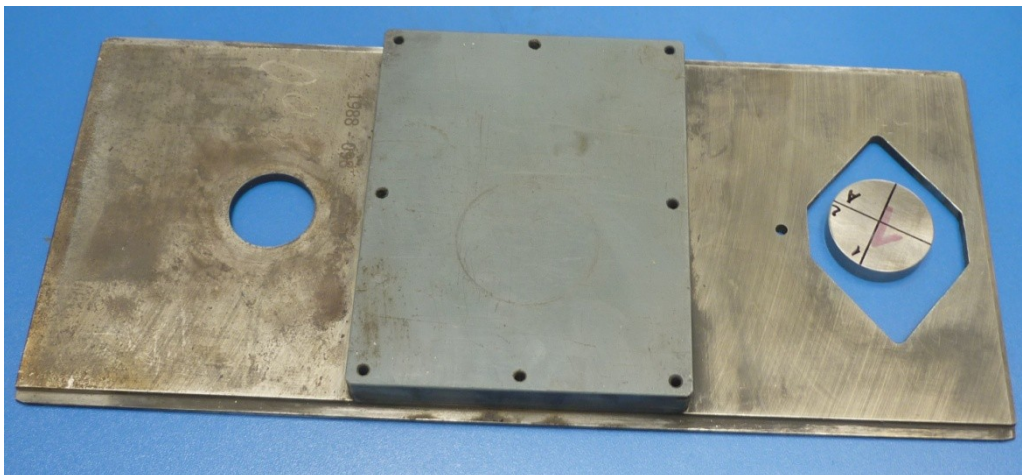
brusné vrstvy kotouče a vzorek V2 byl broušen po dvaceti brousících cyklech a vzorek V0 není obroben je pouze slinut.



Obr. 23 - Označené vzorky pro měření



Obr. 24 - Klec, ve které byly broušeny vzorky



Obr. 25 - Klec a vzorek V1

#### 4.1. Bruska WBM 221 od firmy

Bruska, kterou se brousily vzorky ze slinutých karbidů (obrázek 26.), byla pořízena ve firmě Winterthur technology group ze Švýcarska. Tato bruska má velký úspěch. Stále vylepšovaný stroj má dva brusné kotouče o velikosti 500 mm (jeden z kotoučů je na obrázku 27.). Dolní kolo je pevně upevněno v axiálním směru, horní kolo naopak nastavitelné na požadovanou velikost. Stroj má hydraulický systém a ten pomáhá dosáhnout vysokou tepelnou stabilitu. Obsahuje excentrické in-systémy. Má automaticky nastavitelné zarážky, které můžou být umístěny i na obrobky s extrémní přesností. Přednosti jsou především v:

- broušení dvou ploch na jednou,
- přesná geometrická a rozměrová měření na několik mikrometrů (až do 50 mm na délku nebo průměr),
- automatická zprava CBN a diamantového brusného kotouče ve stroji,
- výkonný průmyslový systém SIEMENS,
- snadné ovládatelné uživatelské rozhraní,
- krátké seřizovací časy, VG + kamerový systém pro automatickou detekci obrobku. [9]





Obr. 26 - Bruska WBM 221, na které se brousily vzorky



Obr. 27 - Brusný kotouč

#### 4.2. Měření konkrétního případu

Měření bylo provedeno na pracovišti katedry mechanické technologie VŠB TUO pod supervizí Vl. Ochodka ([vladislav.ochodek@vsb.cz](mailto:vladislav.ochodek@vsb.cz)). Pro měření byla použita interní metodika dle lit. [13]. Zbytkové napětí bylo vyhodnoceno podle úrovně magnetického parametru MBN.

Bylo provedeno ve statickém režimu ve středu vzorku ve dvou směrech pootočených o  $90^\circ$  z obou stran vzorku (obr. 30.). Výsledná hodnota MBN je průměrem z pěti měření. Měření bylo prováděno na povrchu vzorků do hloubky 0,1mm. Zbytkové napětí vnesené broušením bylo vyhodnoceno podle úrovně magnetického parametru MBN. Laboratorní pracoviště v VŠB-TU Ostrava je vyfoceno Ing. Vladislavem Ochodkem na obrázku 28. a na obrázku 29. jsou vyfoceny snímače pro měření Barkhausenova šumu.



Obr. 28 - Laboratorní pracoviště pro měření zbytkových napětí (Katedra mechanické technologie VŠB TUO (pro měření byl použitý analyzátor Intro-2a, software Itroscan-2a))



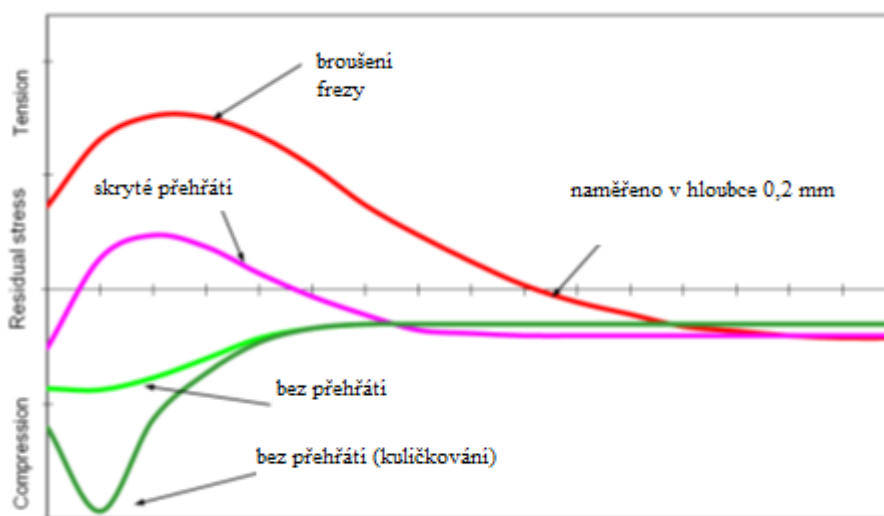
Obr. 29 - Snímače pro měření Barkhausenova šumu (pro měření byl použitý snímač SM1 první zleva)



Obr. 30 – Vzorky před měřením

## 5. DISKUZE EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Výsledkem experimentálních prací je výsledek měření za pomoci metody Barkhausenova šumu. Výsledky vycházejí v jednotkách MBN (milivolty). Čím vyšší jednotka, tím je zbytkové pnutí více do tahu. Naopak čím nižší hodnoty, tím je zbytkové pnutí více do tlaku. Příklady pnutí jsou uvedeny na obrázku 31.



Obr. 31 – Příklady pnutí



Výsledky jsou shrnuty v následujících tabulkách:

Vzorek V0			
Číslo měření	strana vzorku	osa vzorku	hodnota MBN (milivoly)
1	A	1	542
2	A	1	539
3	A	1	539
4	A	1	539
5	A	1	540
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			540
1	A	2	526
2	A	2	528
3	A	2	528
4	A	2	528
5	A	2	528
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			528
1	B	1	606
2	B	1	605
3	B	1	608
4	B	1	606
5	B	1	603
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			606
1	B	2	630
2	B	2	628
3	B	2	627
4	B	2	630
5	B	2	628
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			629

Tab. 8 - Naměřené hodnoty na vzorku V0

Vzorek V1			
Číslo měření	strana vzorku	osa vzorku	hodnota MBN (milivolty)
1	A	1	578
2	A	1	569
3	A	1	571
4	A	1	570
5	A	1	570
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			572
1	A	2	572
2	A	2	574
3	A	2	572
4	A	2	571
5	A	2	573
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			572
1	B	1	541
2	B	1	538
3	B	1	540
4	B	1	539
5	B	1	536
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			539
1	B	2	540
2	B	2	539
3	B	2	539
4	B	2	539
5	B	2	539
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			539

Tab. 9 - Naměřené hodnoty na vzorku V1

Vzorek V2			
Číslo měření	strana vzorku	osa vzorku	hodnota MBN (milivolty)
1	A	1	563
2	A	1	563
3	A	1	562
4	A	1	563
5	A	1	566
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			563
1	A	2	549
2	A	2	547
3	A	2	546
4	A	2	545
5	A	2	548
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			547
1	B	1	537
2	B	1	538
3	B	1	535
4	B	1	537
5	B	1	537
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			537
1	B	2	537
2	B	2	537
3	B	2	537
4	B	2	536
5	B	2	533
Ø NAMĚŘENÝCH HODNOT:			536

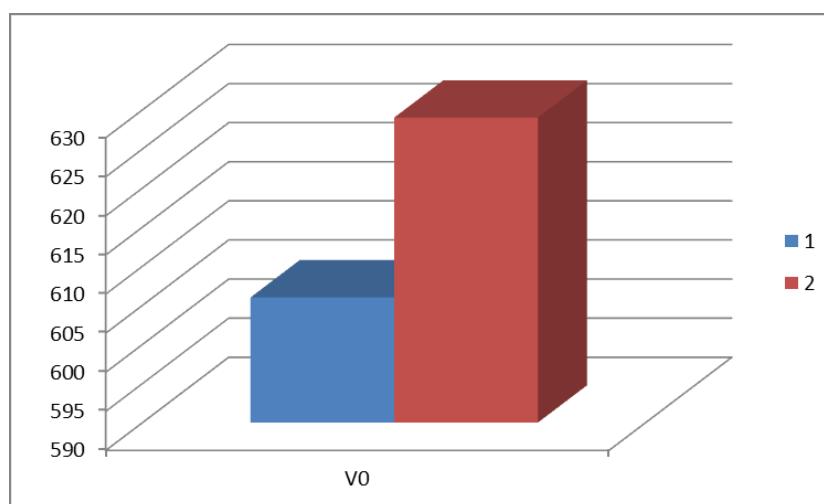
Tab. 10 - Naměřené hodnoty na vzorku V2

Tyto výsledky měření lze shrnout do jedné tabulky s průměrnými hodnotami a graf vizuálně porovnávající naměřené hodnoty u jednotlivých vzorcích:

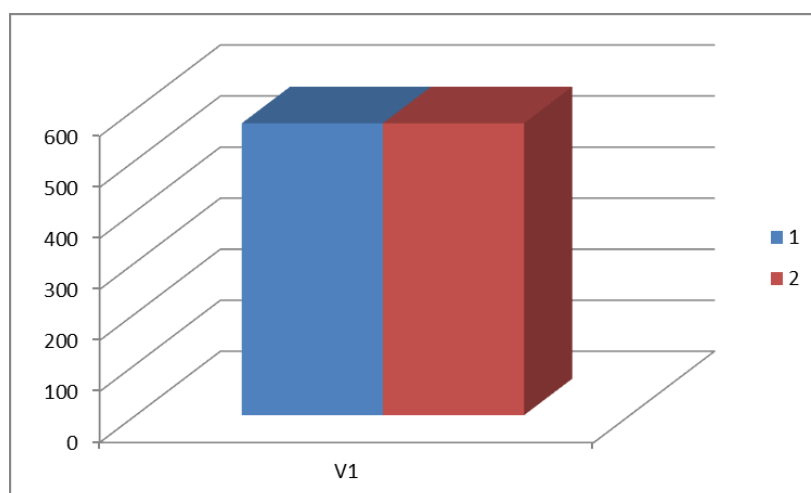
Průměrné hodnoty vzorků				
Vzorek	strana a osa vzorku	Hodnoty (milivolty)		Hodnoty (milivolty)
V0	A	MBN	B	MBN
	1	540	1	606
	2	528	2	629
V1	A	MBN	B	MBN
	1	572	1	539
	2	572	2	539
V2	A	MBN	B	MBN
	1	563	1	537
	2	547	2	536

Tab. 11 - Hodnoty naměřené u jednotlivých vzorků

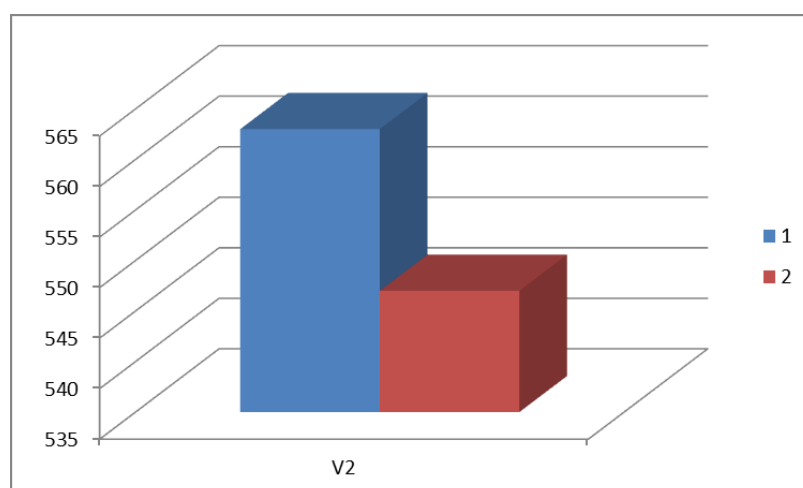
Z těchto tabulek s výslednými hodnoty se vyhotovily následující grafy, které porovnávají strany jednotlivých vzorků a jednotlivé vzorky mezi sebou (hodnoty v grafech jsou uváděny v milivoltech [MBN]):



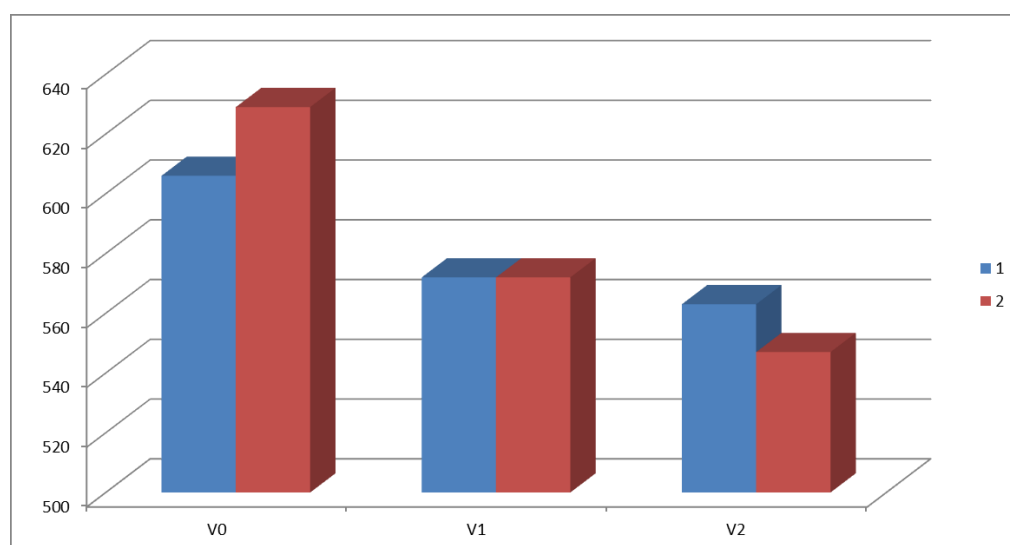
Graf 1 – Porovnání pnutí ve vzorku V0 na stranách 1, 2 (A, B)



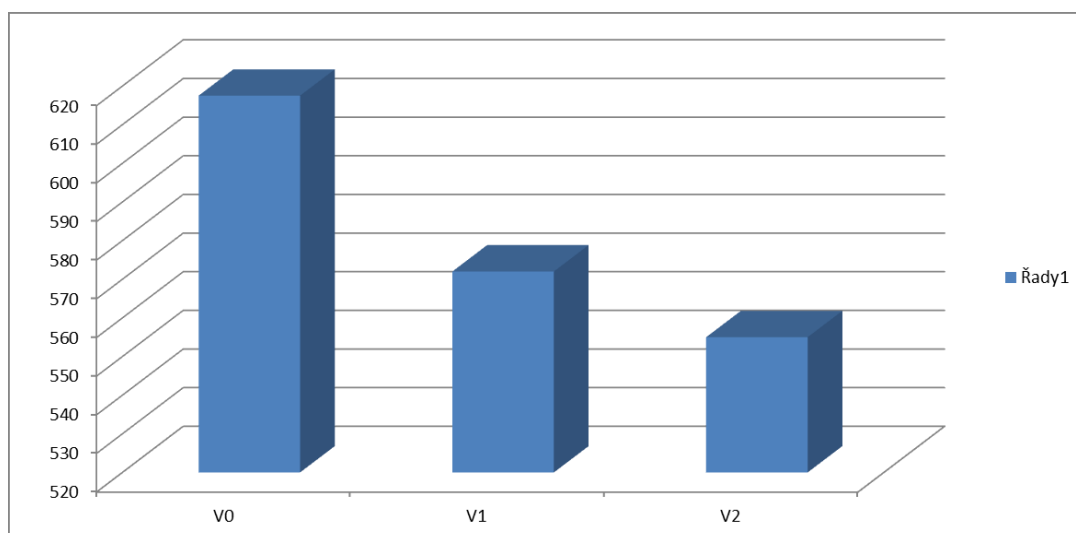
Graf 2 - Porovnání pnutí ve vzorku V1 na stranách 1, 2 (A, B)



Graf 3 - Porovnání pnutí ve vzorku V2 na stranách 1, 2 (A, B)



Graf 4 - Porovnání pnutí ve vzorcích na stranách 1, 2 (A, B)



Graf 5 – Porovnání celkového pnutí ve vzorcích V0, V1 a V3

Graf 1. popisuje pnutí ve vzorku V0, který je pouze slinut. Pnutí bylo naměřeno u obou stran. Strana 1 (A) vykazuje menší pnutí než strana 2 (B), tento jev je nejspíš ovlivněn nerovnoměrným slinováním.

Graf 2. popisuje pnutí ve vzorku V1, tento vzorek je broušen samostatně pro oživení brusné vrstvi kotouče. Hodnoty vycházejí téměř totožné jak na straně 1 (A), tak i na straně 2 (B). Z tohoto lze usoudit, že broušení pouze jednoho kusu nám může zaručit téměř totožné hodnoty na obou stranách.

Graf 3. poukazuje na pnutí ve vzorku V3, tento vzorek je broušen po dvaceti brousících cyklech. Naměřené hodnoty vypovídají, že strana 1 (A) má vyšší hodnoty MBN než strana 2 (B). Z toho lze usoudit, že tato metoda není moc vhodná pro stejné vlastnosti na obou stranách vzorku.

Grafy 4. a 5. popisují pnutí ve všech měřených vzorcích. Na těchto grafech lze pozorovat, že vzorek V0 má pnutí spíše tahové a vzorky V1 a V2 naopak pnutí tlakové.

## 6. TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Měřením pomocí metody Barkhausenova šumu v laboratořích VŠB-TU Ostrava se prokázalo zbytkové pnutí tlakové po broušení. Před broušením na výrobku toto pnutí bylo tahové. Toto experimentální měření je základem pro následující výzkum slinutých karbidů po broušení metodou Barkhausenova šumu. Navazující další výzkum by se zaměřil na různé způsoby broušení a určil by nejvhodnější podmínky broušení pro výrobky ze slinutých karbidů (na základě zbytkového pnutí). Tímto by se výroba ve firmě Pramet tools s. r. o. velmi zefektivnila a snížila by se míra zmetkovitosti, která se pohybuje v současnosti kolem 6%.

## 7. ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout metodiku měření a prokázat zbytkové pnutí výrobků ze slinutých karbidů po broušení, které vyrobila firma Pramet tools s. r. o.

Jako metodiku měření jsem zvolil Barkhausenův šum, která byla provedena v laboratořích VŠB-TU Ostrava Ing. Vladislavem Ochodkem. Jak vyplývá z výsledků experimentálního měření, bylo prokázáno tlakové zbytkové pnutí po broušení výrobků ze slinutých karbidů. Toto zjištění bude sloužit k vývoji technologických postupů ve společnosti Pramet tools s. r. o.

**PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. z katedry obrábění a montáže, VŠB – TU Ostrava za ochotné rady při zpracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval firmě Pramet tools s. r. o. v Šumperku a Ing. Jaroslavu Václavkovi za možnost vypracovat tuto bakalářskou práci, za vyhotovení požadovaných vzorků pro měření a za cenné rady ke zpracování této bakalářské práce.

Poděkování patří také Ing. Vladislavu Ochodkovi za naměření příslušných vzorků pomocí metody Barkhausenova šumu a cenné rady k tomuto měření.



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Firma Pramet Tools v Šumperku .....	10
Obr. 2 - Historický vývoj řezných rychlostí [2] .....	11
Obr. 3 - Vlastnosti nástrojových materiálů [2] .....	12
Obr. 4 - Vliv mechanických vlastností nástrojového materiálu na pracovní podmínky [2] .....	12
Obr. 5 - Závislost tvrdosti karbidů na teplotě [2] .....	20
Obr. 6 - Nepovlakované krabidy .....	23
Obr. 7 - CVD povlak $\text{TiC}+\text{Al}_2\text{O}_3$ na substrátu typu P [2] .....	26
Obr. 8 - Pětivrstvý povlak 3. Generace [2] .....	26
Obr. 9 - Multivrstvý PACVD povlak 4. generace, $\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [2] .....	27
Obr. 10 - Vliv multivrstvého povlaku na šíření trhlin [2] .....	27
Obr. 11 - Dva příklady broušení do kulata [4] .....	32
Obr. 12 - Vnější bezhroté broušení [4] .....	32
Obr. 13 - Vnitřní bezhroté broušení [4] .....	33
Obr. 14 - Označení brusného kotouče [4] .....	34
Obr. 15 - Vyobrazení tvarů brusných kotoučů [4] .....	34
Obr. 16 - Příklad tvarového broušení [8] .....	35
Obr. 17 - Sestava pro kontrolu těles tlakových čerpadel [5] .....	38
Obr. 18 - Běžné broušení (profil zbytkového napětí) [5] .....	39
Obr. 19 - Nevhodné broušení (profil zbytkového napětí) [5] .....	40
Obr. 20 - Typické vady promítnuty pomocí Barkhausenova šumu [5] .....	40
Obr. 21 - Laboratorní difraktometr .....	41
Obr. 22 - Důsledky tlakového a tahového pnutí [6] .....	42
Obr. 23 - Označené vzorky pro měření .....	44
Obr. 24 - Klec, ve které byly broušeny vzorky .....	44
Obr. 25 - Klec a vzorek V1 .....	45
Obr. 26 - Bruska WBM 221, na které se brousily vzorky .....	46
Obr. 27 - Brusný kotouč .....	46
Obr. 28 - Laboratorní pracoviště pro měření zbytkových napětí (Katedra mechanické technologie VŠB TUO (pro měření byl použitý analyzátor Intro-2a, software Itroscan-2a)) .....	47

Obr. 29 - Snímače pro měření Barkhausenova šumu (pro měření byl použitý snímač SM1 první zleva).....	47
Obr. 30 – Vzorky před měřením .....	47
Obr. 31 – Příklady pnutí .....	48

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 - Historický vývoj SK [2].....	19
Tab. 2 - Vlastnosti karbidů a nitridů [2].....	22
Tab. 3 - Vlastnosti karbidů a nitridů (pokračování) [2] .....	23
Tab. 4 - Možné kombinace materiálů (podklad – povlak) [2] .....	24
Tab. 5 - Důležité stupně ve vývoji tvrdých povlaků [2] .....	28
Tab. 6 - Obecné porovnání vlastností základních povlakových materiálů [2].....	30
Tab. 7 – Tabulka zachycující hodnoty drsnosti povrchu a dosahované přesnosti .....	36
Tab. 8 - Naměřené hodnoty na vzorku V0 .....	49
Tab. 9 - Naměřené hodnoty na vzorku V1 .....	50
Tab. 10 - Naměřené hodnoty na vzorku V2 .....	50
Tab. 11 - Hodnoty naměřené u jednotlivých vzorků.....	51

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1 – Porovnání pnutí ve vzorku V0 na stranách 1, 2 (A, B).....	51
Graf 2 - Porovnání pnutí ve vzorku V1 na stranách 1, 2 (A, B) .....	52
Graf 3 - Porovnání pnutí ve vzorku V2 na stranách 1, 2 (A, B) .....	52
Graf 4 - Porovnání pnutí ve vzorcích na stranách 1, 2 (A, B).....	52
Graf 5 – Porovnání celkového pnutí ve vzorcích V0, V1 a V3 .....	53

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. Vyd. Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno: MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-2250-2.
- [3] HUMÁR, A.; PÍŠKA, M. *Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály*. MM Půmyslivé spectrum, Speciální vydání, 2004, 110 s. ISSN 1212-2572.
- [4] BILÍK, Oldřich. *Obrábění I - 2.díl*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2002. ISBN 80-248-0033-0.
- [5] OCHODEK, Vladislav a Jiří MALEC. *Strojírenská technologie: Využití Barkhausenova šumu ke kontrole a optimalizaci procesu broušení*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta.
- [6] Vnitřní pnutí při galvanickém pokovení. In: PAKOSTA, Ing. Michal. stc.fs.cvut [online]. 2010 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/History/2010/Sbornik/papers/pdf/PakostaMichal-325952.pdf>
- [7] Historie a současnost Pramet Tools. Iprosperita [online]. 2012 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://www.iprosperita.cz/firmy/2145-historie-a-soucasnost-pramet-tools>
- [8] Brusky Okamoto. misan [online]. 2012 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/clanky/2012-02-16-spolehlive-brusky-okamoto---bezpecna-cesta-do-sveta-mikroprocesoru/>

- [9] Bruska WBM. Winterthurtechnology [online]. 2012 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z:  
<http://www.winterthurtechnology.com/en/group/solution-finder/wendt-machines/surface-grinding/wbm-221-wbm-221-duolift.html>
- [10] Pramet. Pramet [online]. 2013 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z:  
<http://www.pramet.com/cz/o-spolecnosti/pramet-ceska-republika.html>
- [11] Vyměnitelné břitové destičky. Pramet [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z:  
<http://www.pramet.com/cz/produkty/soustruzeni/vymenitelne-britove-desticky.html>
- [13] OCHODEK, V. Kalibrace magnetoelastické metody pro měření dvojosých zbytkových napětí. VŠB TU Ostrava, 2007, 15s.